



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Kaupo Kokamägi**

**MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKI ABIL TEHTUD  
AEROFOTODE PÕHJAL PUISTANGU MAHTUDE  
ARVUTAMISE TÄPSUS**

**ACCURACY OF STOCKPILE VOLUME CALCULATIONS  
BASED ON UAV PHOTOGRAMMETRY**

Magistritöö

Geodeesia ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Natalja Liba, *PhD*

Kaasjuhendaja: geodeesiainsener Kristo Must, *MSc*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Kaupo Kokamägi		Õppekava: geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus			
Lehekülgi: 89	Jooniseid: 37	Tabeleid: 20	Lisasid: 2
Õppetool: ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Geomaatika 4. Loodusteadused ja tehnika, Geodeesia (P515)	
Juhendajad:		dotsent Natalja Liba, geodeesiainsener Kristo Must	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu 2018	
<p>Käesoleva magistritöö eesmärk on hinnata mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode kasutamise sobivust puistangu mahtude arvutamiseks ja saadud tulemuste vastavust sätestatud nõuetele. Lisaks sellele võrreldakse kahte erinevat mehitamata õhusõidukit ja kahte tüüpi maapinnal kasutatavaid tähiseid ja hinnatakse erinevatele töötappidele kulunud aega.</p> <p>Käesoleva töö jaoks koguti andmeid 2017. aasta sügisel Läänemaal, Laiküla turbamaardlas ja 2018. aasta kevadel Järvemaal, Karude karjääris. Uuritavateks objektideks olid korrapärase kujuga turbaaun ja ebakorrapärase kujuga purustatud kruusa puistang. Esimesel objektil teostati mõõtmised terrestrilise laserskanneri, GNSS seadme ja kahe erineva mehitamata õhusõidukiga. Teisel objektil teostati mõõtmised terrestrilise laserskanneri, GNSS seadme ja ühe mehitamata õhusõidukiga. Mahtude täpsuse määramisel loeti õigeks laserskaneerimise tulemustest moodustatud mudeli maht.</p> <p>Kõigi fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused võrdluseks olnud laserskaneerimise tulemusel loodud mahust jäid alla 4%, mis jääb Markšeidertöö korras kehtestatud lubatud erinevuse 12% piiresse (Markšeidertöö kord 2012, § 4 lg 3). Laiküla turbamaardla puhul saadi RTK GNSS meetodil määratud mahu suhteliseks erinevuseks 5,81 protsenti ja erinevate fotogramm-meetrilisel teel leitud mahtude tulemused jäid 0,7 ja 3,19 protsendi vahele. Karude objekti puhul olid vastavateks tulemusteks 3,28 protsenti ja 2,32 kuni 3,70 protsenti. Erinevatele meetoditele ja töötappidele kulunud aegu hinnates selgus, et mida suurem, keerulisem ja raskesti ligipääsetavam on objekt, seda enam tulevad välja mehitamata õhusõidukite kasutamise eelised.</p> <p>Uurimistöö käigus selgus, et mehitamata õhusõidukite kasutamine mahtude määramisel annab piisava täpsuse ning selleks sobib ka odavam mehitamata õhusõiduk. Leiti, et mahtude määramiseks piisav täpsus saavutati ka ilma tähiseid kasutamata, lisaks sellele ei olnud suurt mõju tulemustele sellel kas kasutati aerosoolvärviga või spetsiaalseid tähiseid. Siiski paranes mahu määramise täpsus tähiste arvu suurendades. Kinnitust saadi ka hüpoteesile, et mehitamata õhusõidukite kasutamine aitab märgatavalt vähendada mahtude määramiseks vajalikele välitöödele kuluvat aega.</p>			
Märksõnad: mehitamata õhusõiduk, fotogramm-meetria, mahu arvutamine			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kaupo Kokamägi		Speciality: Land Surveying and Land Management	
Title: Accuracy of stockpile volume calculations based on UAV photogrammetry			
Pages: 89	Figures: 37	Tables: 20	Appendixes: 2
Chair:		Geomatics	
Field of research and (CERC S) code:		4. Natural Sciences and Engineering, Geodesy (P515)	
Supervisors:		associate professor Natalja Liba, geodesy engineer Kristo Must	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>The aim of current study was to assess the compliance of accuracy of stockpile volume calculations based on UAV photogrammetry to current laws in Estonia. Two different UAVs and two different objects were compared in this study. The accuracy of photogrammetric models was also compared to the accuracy of a model based on RTK GNSS survey. Amount of time spent on different parts of the project was also evaluated.</p> <p>Data used in current study was collected in autumn of 2017 in Laiküla peat extraction area in Lääne County, Estonia and spring of 2018 in Karude gravel pit in Järva County, Estonia. Observed objects were a regularly shaped peat stockpile and an irregularly shaped gravel stockpile. On the first site, data was collected with a terrestrial laser scanner, a GNSS device and two different UAVs. On the second site data was collected with a terrestrial laser scanner, a GNSS device and one UAV. For accuracy assessment, volume of different models was compared to the volume of the models based on laser scanning data.</p> <p>The study found that the RMSE (Root Mean Square Error) of different photogrammetrical models of the Laiküla object (722,52 m3) was 14,31 m3 and the RMSE of different photogrammetrical models of the Karude object (674,04 m3) was 20,95 m3. Relative errors of all of the photogrammetrical models were under 4%, which is smaller than the allowed error of 12% in Estonia. Relative error of RTK GNSS model of Laiküla object was 5,81% and relative errors of different photogrammetric models of the same object were between 0,70% and 3,19%. Respective errors of Karude object were 3,28% and 2,32% to 3,70%. It was found that the advantages of UAV photogrammetry become apparent as the size and complexity of the objects grow.</p> <p>Results show that using UAV photogrammetry to determine stockpile volumes is sufficiently accurate with both of the tested UAVs. Still, it is important that using UAVs for geodetic work would be done by trained professionals and all the legal requirements would be met. It was found that sufficient accuracy was also achieved without using the GCPs (Ground Control Points). However, using GCPs did increase the accuracy. Furthermore, using different types of GCPs had no impact to the accuracy of the volume. Still, using more GCPs also increased the accuracy.</p>			
Keywords: UAV, photogrammetry, volume calculation			

# SISUKORD

LÜHENDITE JA MÕISTETE LOETELU .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	9
1.1 Mahu määramine .....	9
1.1.1 Andmete kogumine mahu määramiseks.....	9
1.1.2 Mahtude määramise meetodid.....	12
1.1.3 Mahtude arvutamise täpsuse nõuded.....	14
1.2 Mehitamata õhusõidukite fotogramm-meetria.....	15
1.2.1 Digitaalse foto jäädvustamine .....	19
1.2.2 Mehitamata õhusõidukite klassifitseerimine .....	21
1.2.3 Mehitamata õhusõidukitega seotud seadusandlus .....	23
1.2.4 Fotogramm-meetrilised tööd mehitamata õhusõidukite andmete põhjal .....	24
1.2.5 Ülevaade Eestis tehtud uurimistöödest.....	28
1.2.6 Ülevaade mujal maailmas tehtud uurimistöödest.....	32
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	37
2.1 Uurimistöö objekt ja kasutatud vahendid .....	37
2.1.2 Kasutatud riistvara.....	39
2.1.3 Kasutatud tarkvara.....	42
2.2 Uurimistöös kasutatud materjal ja meetoodika.....	42
2.2.1 Mõõdistustööde läbiviimine Laiküla turbamaardlas .....	44
2.2.2 Mõõdistustööde läbiviimine Karude karjääris.....	47
2.2.3 Andmete töötlus.....	49
3. UURIMISTÖÖ TULEMUSED.....	56
3.1 Erinevate objektide kohta loodud mudelite mahud .....	56

3.1.1	Laiküla turbamaardla objekti mudelite mahud .....	56
3.1.2	Karude karjääri objekti mudelite mahud .....	57
3.2	Mahtude täpsuse hindamine.....	57
3.2.1	Laiküla turbamaardla objekti mudelite mahtude täpsuse hindamine .....	58
3.2.2	Karude karjääri objekti mudelite mahtude täpsuse hindamine.....	60
3.3	Mahtude määramisele kulunud aeg .....	63
3.4	Arutelu .....	66
KOKKUVÕTE .....		69
VIITED.....		71
ACCURACY OF VOLUME CALCULATIONS BASED ON UAV PHOTOGRAMMETRY .....		76
LISAD .....		78
Lisa 1. Uurimistöös kasutatud riistvara spetsifikatsioonid.....		79
Lisa 2. GNSS mõõtmiste raportid .....		84

## LÜHENDITE JA MÕISTETE LOETELU

CFA – (*colour filter array*) digitaalse kaamera värvide tuvastamiseks kasutatav sensoril olev värviliste filtrite võrgustik, mis laseb igale pikslile langeda vaid teatud värvi valgusel, tehes need tundlikuks punasele, sinisele või rohelisele valgusele

EASA – (*European Aviation Safety Agency*) Euroopa Lennundusohutusamet

GNSS – (*Global Navigation Satellite System*) satelliitnavigatsiooni süsteem, mis võimaldab ülemaailmset asukohamäärangut

IMU – (*Inertial Measurement Unit*) seade, mis mõõdab ja salvestab sõiduki pöördenurga ning kiirenduse väärtusi kolme ristuva telje sihis

INS – (*Inertial Navigation System*) navigatsioonisüsteem, mis lähtub IMU andmetest

ISO – valgustundlikkus

JPEG – (*Joint Photographic Experts Group*) digitaalse pildi pakitud formaat

Kriging – geostatistikas kasutatav interpoleerimise meetod

KRV – keskmine ruutviga

TIN – (*Triangular Irregular Network*) kolmnurkadest koosnev pinnamudel

UAV – (*Unmanned Aerial Vehicle*) mehitamata õhusõiduk

PDOP – (*Positional Dilution of Precision*) positsioneerimissatelliitide omavahelist paiknemist iseloomustav suurus, mida väiksem on PDOP väärtus, seda täpsem on mõõtmine

RAW – (*Raw image file*) digitaalkaamera poolt toodetav pildi formaat, mis sisaldab pildi kohta käivat töötlemata infot

RTK – (*Real Time Kinematic*) mõõdistustulemuste reaajajas parandamiseks virtuaalset- või referentsjaama kasutatav GNSS lahendus

## SISSEJUHATUS

Mehitamata õhusõidukite kasutamine on kiiresti arenev ja aina enam levinud viis mõõdistusandmete kogumiseks. Põhiliselt kasutatakse seda ohtlike, raskesti ligipääsetavate ja suurte objektide puhul, kus nõutud täpsus ei ole väga kõrge. Mehitamata õhusõidukitelt kogutud aerofotosid saab kasutada nii tavageodeesias, kui ka ortofotode ja erinevate kolmemõõtmeliste mudelite loomiseks. Tänu mehitamata õhusõidukite populaarsusele on väiksemad mehitamata õhusõidukid jõudnud masstootmisesse ja on seega ka tavakasutajale kättesaadavad. Lisaks sellele on tarkvara ja arvutustehnika areng loonud võimalused väiksemate ja odavamate kaamerate kasutusele võtmiseks fotogramm-meetrias.

Tänu sellistele arengutele tuntakse mehitamata õhusõidukite kasutamise vastu mõõdistustöödel, seal hulgas mahtude määramisel, aina enam huvi, kuid Eestis ei ole antud meetodi vastavust mahtude määramisele kehtestatud nõuetele varem uuritud.

Uurimistöö teema, mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus, valiti väljaselgitamaks, kas mehitamata õhusõidukeid võiks kasutada puistangu mahtude määramise efektiivsemaks muutmisel ja kas see on piisavalt täpseks alternatiiviks tavapärastele RTK GNSS mõõtmistele.

Töö jaguneb kolme ossa. Esimene osa kirjeldab üldisemalt mehitamata õhusõidukite andmetel põhineva fotogramm-meetria aluseid ja tehtud uurimistöid Eestis ja välismaal. Teises osas antakse ülevaade uurimistöö objektidest ja kasutatud riist- ning tarkvarast ja antakse ülevaade mehitamata õhusõiduki andmete põhjal arvutatud puistangu mahtude täpsuse hindamise metoodikast. Kolmandas osas kirjeldatakse saadud tulemusi, analüüsitakse neid ning arutletakse saadud tulemuste üle.

Uurimistöö jaoks valiti välja kaks objekti, kus laserskaneerimise tulemustest loodud mudelite mahud loeti õigeks. Esimene objekt oli korrapärase kujuga turbaaun ning teine ebakorrapärase kujuga purustatud kruusa puistang. Esimesel objektil teostati mõõtmised terrestrilise laserskanneri, GNSS seadme ja kahe erineva mehitamata õhusõidukiga. Teisel objektil teostati mõõtmised terrestrilise laserskanneri, GNSS seadme ja ühe mehitamata õhusõidukiga.

Uurimistöö eesmärk oli välja selgitada, kas mehitamata õhusõidukilt pildistatud fotodest loodud mudeli abil on võimalik täita mahtude arvutamiseks seatud nõudeid. Lisaks sellele uuriti, kuidas mõjub tulemusele erineva hinnaklassi mehitamata õhusõidukite kasutamine ning erinevate ja erineva arvu tähiste kasutamine ning objektide omadused.

Uurimistöös püstitati järgmised hüpoteesid:

- Mehitamata õhusõidukitelt tehtud aerofotode põhjal mahtude arvutamise täpsus jääb Markšeideritöö korras kehtestatud lubatud erinevuse 12% piiresse (Markšeideritöö kord 2012, § 4 lg 3).
- Fotode orienteerimiseks võib kasutada ka aerosoolvärviga tehtud tähiseid.
- Mehitamata õhusõidukite kasutamine mahtude määramisel vähendab oluliselt välitöödele kuluvat aega

Autor tänab enda juhendajaid Natalja Liba ja Kristo Musta. Lisaks avaldab autor tänu osaühingule Raxoest ja selle tegevjuhile Mart Raele, tänu kellele saadi kasutada uurimistöös kasutatud seadmeid ning Eesti Maaülikooli üliõpilasele Reijo-Tero Roopalule, kes aitas andmete kogumisel.



# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1 Mahu määramine

Välja kaevandatud ja kokku veetud materjalide mahtude määramine on üks põhilistest mõõdistustöödest erinevate kaevetööde puhul, nagu näiteks teede õgvendamine, tammide ja tunnelite ehitamine ja kaevandamine. Täpsete plaanide tegemine sõltub suuresti mahtude määramisest. (Siriba jt 2015)

Mahtude määramine koosneb andmete kogumisest, mudeli loomisest ja mahu arvutamisest. Järgnevalt antakse ülevaade nendest tegevustest ning mahtude määramist puudutavatest nõuetest.

### 1.1.1 Andmete kogumine mahu määramiseks

Ehitus- ja kaevanduspiirkondades mõõdetakse puistangusse ladestatud materjale enamasti manuaalseid tehnikaid kasutades (RTK GNSS ja tahhümeetiline mõõdistamine). Sellega kaasnevad teatavad riskid ja probleemid, eriti kui on vaja ronida kõrgete ja varisemisohtlike puistangute otsas. (Siriba jt 2015)

Laoplatside, karjääride ja prügilate mõõdistamiseks kasutatakse erinevaid meetodeid, mille käigus kogutakse kolmemõõtmelise andmeid: tahhümeetria, RTK GNSS, aerofotogrammeetria ning aero- ja terestriiline laserskaneerimine. (Siriba jt 2015)

**Tahhümeetria** on tavapärane mõõdistusviis, mille käigus määratakse kaugused ja suunad instrumendist ning arvutatakse nende kaudu koordinaadid. Tänapäeval kasutatakse selleks enamasti erinevat tüüpi elektrontahhümeetreid. (Siriba jt 2015)

Elektrontahhümeetrit saab kasutada nii prismaga, kui ilma. Mõõdistuse käigus tuleb rajada seisupunktid ümber mõõdistatava objekti nii, et oleks tagatud nähtavus kogu objektile. Igas seisupunktis mõõdetakse punktid puistangu jalamile, et määrata maapinda ning seejärel mõõdetakse punktid puistangu peale, et määrata puistangu pinda. Punktid tuleb valida selliselt, et maa- ja puistangu pind oleks kirjeldatud võimalikult täpselt. Mõõdetavate

punktide tihedus ja asetus sõltub pinna keerukusest. Mida keerukam objekt, seda tihedamalt tuleks punkte mõõta. Tänapäevase elektrontahhümeetri abil on võimalik mõõta ka üksi, mis teeb töö ökonoomsemaks. (Siriba jt 2015)

**GNSS mõõtmiste** puhul määratakse punktide koordinaadid maapinnal satelliitide abil. Erinevate GNSS mõõtmisviiside tulemuseks on samuti kolmemõõtmelised koordinaadid. Mahtude määramiseks kasutatakse kõige enam RTK meetodit, kuna see on kiire ja võrdlemisi täpne. RTK GNSS meetodil on võimalik saavutada täpsust 2-5 cm ning kui mõõtmisi ajaliselt pikendada on võimalik täpsust ka parandada. RTK GNSS opereerimiseks on samuti vaja ainult ühte inimest, aga kuna pole vaja instrumenti eraldi üles seada (kui baasjaamade võrk on olemas), siis on RTK GNSS mõõtmine kiirem, kui tahhümeetiline mõõtmine. Samas seab GNSS mõõdistusele taeva laotuse avatus ja lisaks sellele tuleb mõõtmiseks alati ise mõõdetavasse punkti minna, mis võib mõne objekti puhul ohtlik olla. (Siriba jt 2015)

**Terrestriline laserskaneerimine** on mingil määral sarnane ilma prismata tahhümeetrilisele mõõdistamisele. Terrestrilise laserskaneerimise puhul on ühel inimesel võimalik andmeid koguda kiiresti ning tulemused on väga täpsed. Terrestrilise laserskaneerimise puuduseks on võimalikud mõõtmata jäänud punktid, mis ei ole skanneri asukohast nähtavad ning mille tõttu võib tekkida vale ettekujutus puistangu kujust (joonis 1.1). (Siriba jt 2015)



**Joonis 1.1.** Skannitud punktid on näidatud roheliste nooltega ja skaneerimata jäänud punktid punaste nooltega. Skanner asub joonisel olevast puistangust vasakul. (Siriba jt 2015)

Lisaks staatilisele laserskaneerimisele kasutatakse suuremate objektide puhul ka mobiilset laserskaneerimist, mille puhul skanner asub mingil liikuv alusel (nt auto), mis on varustatud GNSS ja IMU seadmetega, et määrata skanneri asukoht ja orientatsioon igal ajahetkel. (Siriba jt 2015)

**Aerolaserskaneerimisel** on mitmeid sarnasusi aerofotogramm-meetria ja mobiilse laserskaneerimisega. Nii aerofotogramm-meetrias, kui ka aerolaserskaneerimise puhul omistatakse punktidele kolmemõõtmelised koordinaadid, tekitades nii punktipilved. On välja selgitatud, et täpse digitaalse kõrgusmudeli loomiseks vajalik punktihedus oleneb objekti pinna keerukusest. Seega on võimalik kogutud andmete mahtu märkimisväärselt vähendada, ilma kõrguslikku täpsust oluliselt kaotamata. (Liu jt, 2007)

Käesolevas töös uuritakse põhiliselt **aerofotogramm-meetrilist** meetodid, seepärast keskendutakse edaspidi sellele põhjalikumalt.

### 1.1.2 Mahtude määramise meetodid

Kolm põhilist viisi mahtude määramiseks on ristlõigete, kontuuride ja punktide kõrguste järgi mahu määramine. (Bannister jt 1992).

**Ristlõigete abil** mahtude määramist saab kasutada ainult juhul, kui mõõdetavate objektide laius ja kallakud on pidevad. Tavaliselt mõõdetakse ristlõiked iga 5, 10, 20, 50 või 100 meetri tagant olenevalt objekti kujust ja nõuetest. Seda meetodit kasutatakse peamiselt pikkade kitsaste objektide puhul nagu näiteks teed ja kraavid. (Siriba jt 2015)

Mahu määramine **kontuuride abil** eeldab, et eelnevalt on loodud kontuurid. See põhineb kahe kontuurjoone kõrguste ja pindala erinevuse põhjal mahu arvutamisel. Puistang jagatakse horisontaalsetesse kihtidesse, mida piiravad kontuurjooned. (Siriba jt 2015)

**Punktide kõrguste järgi** mahu määramine on kõige enam kasutatud meetod, eriti suurte lahtiste kaevanduste puistangute puhul. Tavaliselt jagatakse selle meetodi puhul mõõdetav ala ruudustikuks ning igas ruudu nurgas mõõdetakse kõrgus. Maht arvutatakse mõõdetud punktidest tekkinud pinna ja ajutiselt määratud pinna vahel. (Siriba jt 2015)

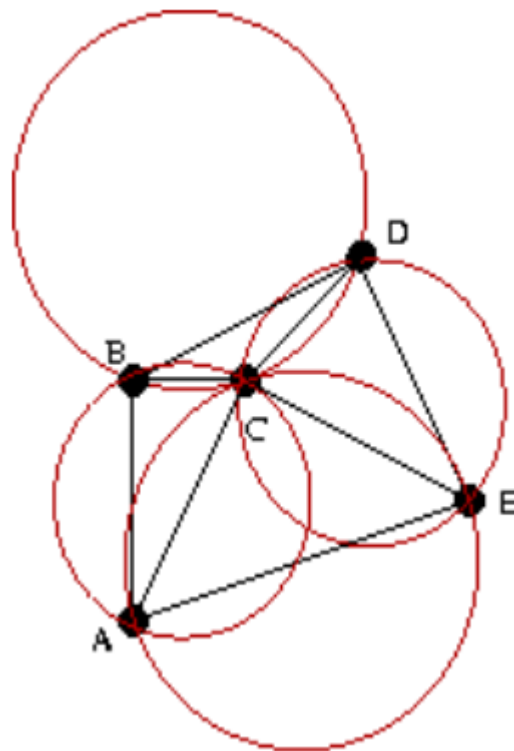
Lisaks eelnevatele on tänapäeval rohkem levinud **pinnamudeli abil** mahu määramine. Mudel luuakse objektile mõõdetud punktide põhjal. Mudelite loomise tehnikad jagatakse jämedalt rasteripõhisteks interpoleerimismeetoditeks ja vektorpõhisteks triangulatsiooni meetoditeks. Rasteripõhiste meetodite puhul luuakse korrapärane võrgustik, mille osakestele (*cell*) leitakse interpoleerimise teel kõrgusväärtused. Vektoripõhiselt on kõige tavalisem pinnamudeli loomise viis TIN (*Triangular Irregular Network*), mis koosneb ebakorrapäraselt paiknevatest kõrgusväärtust omavatest punktidest, mis on omavahel ühenduses, moodustades kolmnurkade võrgu. (Siriba jt 2015)

TIN modelleerimise abil on keerulisema pinnaga aladel võimalik saavutada kõrgem resolutsioon ning seetõttu on see usaldusväärsem, kui korrapärast võrgustiku kasutavad meetodid. TIN meetodit, mis säilitab esialgsed mõõtmistulemused, kasutatakse enamasti väiksematel, suure detailsusega, suuremõõtkavalistel objektidel. Korrapärase võrguga mudeldamist kasutatakse seevastu suurte alade mudeldamisel väiksema mõõtkava puhul. (Meenar, Sorrentino 2009)

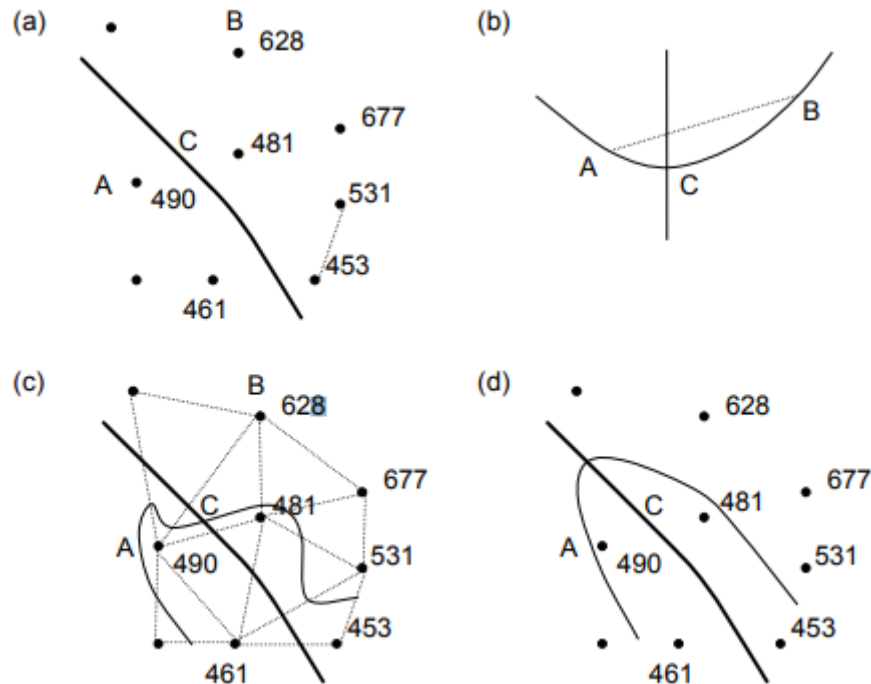
Kummagi meetodiga loodud pindu ei loeta täielikult kolmemõõtmelisteks struktuurideks, kuna nad ei sisalda kunagi samadel horisontaalsetel koordinaatidel mitut kõrgusväärtust.

Sellepärast ei saa ühe pinna abil kirjeldada näiteks tunneleid ning ühe pinna abil ei saa arvutada mahtu. Mahtude arvutamise jaoks on vaja kahte pinda, millest üks loetakse alus- või referentspinnaks ja teine pealmiseks pinnaks. Pealmise pinna määramiseks kasutatakse üksikuid punkte ja murdjooni. Maht määratakse tavaliselt baaskõrguse või aluspinna ja pealmise pinna vahel. (Siriba jt 2015)

Kõige laiemalt levinud on Delaunay triangulatsioon. Delaunay triangulatsiooni üks põhilisi omadusi on see, et ühegi kolmnurga kõiki tippusid läbiv ringjoon ei läbi ühegi teise kolmnurga tippu (joonis 1.2). Lisaks kõigi punktide arvestamisele saab TIN mudeli loomisel arvestada ka kontuuri iseloomustavate joontega, nagu näiteks mäeharja joon või kraavi põhja iseloomustav joon. Selliste joonte tähtsust iseloomustab joonis 1.3. (Li jt 2005)



**Joonis 1.2.** Kolmnurkade moodustamine Delaunay triangulatsiooni puhul Iga ringjoon läbib ainult ühe kolmnurga tippusid. (Peterson, 2018)



**Joonis 1.3.** Ilma kontuuri iseloomustavaid jooni arvestamata TIN-mudeli loomise tagajärjed: (a) punktid koos oru põhja joonega; (b) võimalik ristlõige punktide A, C ja B kohal; (c) triangulatsioon ilma oru põhja joont arvestamata; (d) kontuur arvestades oru põhja joont. (Li jt 2005)

TIN mudeli loomiseks on punktide kasutamisel kaks võimalust. Esimesel puhul arvestatakse kõiki sisestatud andmeid. See on staatiline moodus Delaunay triangulatsiooni kasutamiseks. Teise võimaluse puhul lubatakse ka punktide lisamine või eemaldamine triangulatsiooni protsessi jooksul. Seda nimetatakse dünaamiliseks triangulatsiooniks. (Li jt 2005)

### 1.1.3 Mahtude arvutamise täpsuse nõuded

Markšeideritööde käigus mõõdetud kahe mõõtesuuruse väärtuse erinevus kordusmõõtmisel ei tohi ületada alla 20000 m<sup>3</sup> puhul 12% (tabel 1.1) (Markšeideritöö kord 2012, § 4 lg 3). Antud töös on lähtutud sellest nõudest, kuna avatud karjäärides teostatavatel mahu

määramistel on mehitamata õhusõidukitega potentsiaalselt võimalik mõõta tunduvalt kiiremini, kui manuaalselt.

**Tabel 1.1.** Markšeideritööde korral ei tohi kahe mõõtesuuruse väärtuse erinevus kordusmõõtmisel ületada tabelis toodud suhtarve (Markšeideritöö kord 2012, § 4 lg 3)

Maht (1000 m <sup>3</sup> )	Kuni 20	20–50	50–200	200–1000	Üle 1000
Kahe erineva määranu lubatud suhteline erinevus väiksema mõõtetulemuse suhtes (%)	12	8	4	3	2

Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavate nõuete paragrahvi 8 järgi on püsikatendite nõutav mõõdistustäpsuse 1:500 ja 1:1000 mõõtkava korral 3 cm ning 1:2000 puhul 5 cm. Muude maapinnapunktide puhul vastavalt 10, 15 ja 20 cm. Metsamaastikul võib see viga olla 1,5 korda suurem. (Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded 2016, § 8 lg 4)

Frees-projektide jaoks tehtavatele mõõdistustele on „Maanteeameti täiendavad nõuded topo-geodeetilistele uurimistöödele teede projekteerimisel“ järgi nõutavaks täpsuseks 2 cm mõõdistusvõrgu suhtes. (Täiendavad nõuded topo-geodeetilistele ... 2008)

## 1.2 Mehitamata õhusõidukite fotogramm-meetria

Mehitamata õhusõidukilt pildistatud fotodel põhinevat fotogramm-meetriat nimetatakse ka UAV fotogramm-meetriaks (*UAV photogrammetry*). See loob uusi võimalusi lähedalt mõõdistamisel ning kombineerib terrestrilise- ja aerofotogramm-meetria. Tulemuseks on odavam alternatiiv klassikalisele aerofotogramm-meetria. (Eisenbeiß 2009)

Mehitamata õhusõidukid on motoriseeritud õhusõidukid, mille pardal ei ole inimesi ja mis on korduvkasutatavad (joonis 1.4). (van Blyenburgh 1999). Need sõidukid on kaugteel juhitud, pool-autonoomsed, autonoomsed või neid variante kombineerivad. (Eisenbeiß 2009). Et õhusõiduk on mehitamata ei tähenda, et ta lendab alati ise, autonoomselt. Mehitamata õhusõidukit opereeriv meeskond võib suurem, kui mehitatud õhusõiduki puhul.

(Everaerts 2008) Käesolevas töös keskendutakse siiski ühe inimese poolt kontrollitavatele mehitamata õhusõidukitele.



**Joonis 1.4.** SwingletCam mehitamata lennuk. (Gonçalves, Henriques 2015)

UAV fotogramm-meetrias kasutatav platvorm sisaldab väikest või keskmise suurusega foto- või video-, soojus- või infrapunakaamerat, laserskannerit või kombinatsiooni eelnevatest. Samuti sisaldab see tihti sensorite asendi, orientatsiooni ja asukoha määramiseks vajalikku tehnikat. Seega võib mehitamata õhusõidukilt kogutud andmetel põhinevat fotogramm-meetriat lugeda uueks fotogramm-meetriliseks mõõdistusviisiks. Aero-, terrestilise- ja UAV fotogramm-meetria võrdlus on toodud tabelis 1.2. (Eisenbeiß 2009)



**Tabel 1.2.** Aero-, terrestrilise ja UAV fotogramm-meetria võrdlus (Eisenbeiß 2009)

	<b>Aerofotogramm-meetria</b>	<b>Terrestiline fotogramm-meetria</b>	<b>UAV fotogramm-meetria</b>
<b>Planeerimine</b>	automaatne, pool automaatne	manuaalne	automaatne, manuaalne
<b>Andmete kogumine ja/või lendamine</b>	pool-autonoomne, manuaalne	autonoomne, pool autonoomne, manuaalne	autonoomne, pool autonoomne, manuaalne
<b>Mõõdetava ala suurusjärg</b>	km <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup> - m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> - km <sup>2</sup>
<b>Piksli suurusjärg maapinnal</b>	cm - m	mm - dm	mm - m
<b>Kaugus objektist</b>	100m kuni 10km	cm- ~300m	m kuni km
<b>Kaamera orientatsioon</b>	normaalne, vahel ka kaldus	kaldus	normaalne/kaldus
<b>Esialgse orientatsiooni absoluutse täpsuse suurusjärg</b>	cm - dm	mm - m	cm -10m
<b>Kasutusvaldkond ja võimalused</b>	suurte alade kaardistamine	väikesed alad ja objektid	väikesed ja suured alad
		arhitektuur ja tööstus	raskesti ligipääsetavad ja ohtlikud objektid
	vaade õhust	vaade maapinnalt	vaade õhust
			reaalajas jälgimine

Mehitamata õhusõidukeid saab kasutada nii suurte kui ka väikeste alade mõõdistamisel. Süsteemi maksumus varieerub suuresti selle keerukusest. Hinnad jäävad 1000 ja mitme miljoni euro vahele, seega võib mehitamata süsteem maksta sama palju või isegi rohkem, kui mehitatud süsteem. (Eisenbeiß 2009)

Mehitamata õhusõidukite põhilised eelised on kasutatavus ohtlikes piirkondades ilma inimese elu ja tervist ohtu seadmata ja ligipääsmatutel aladel madalal kõrgusel lennates, kus mehitatud õhusõidukitega lennata ei saa. Sellised alad on näiteks looduskatastroofide piirkonnad. Samuti on see praktiline võimalus raskesti ligipääsetavates piirkondades, kus ei saa või ei tohi mehitatud lennukiga lennata. Lisaks sellele on mehitamata õhusõidukilt võimalik andmeid koguda ka pilves ilmaga, kui on võimalik lennata pilvedest madalamal. Üks põhilisi eeliseid on see, et puuduvad psühholoogilised piirangud ja majanduslikud kulud, mis kaasnevad mehitatud õhusõidukitega. Lisanduvad ka eelised reaalsajas andmete ülekandmisest kontrolljaama. (Eisenbeiß 2009)

Suurem osa avalikult pakutavatest mehitamata süsteemidest keskenduvad odavatele süsteemidele ja seega on üks suur eelis UAV süsteemi hind, kuna nii süsteem ise, kui ka

selle opereerimine on tunduvalt odavam, kui mehitatud süsteem. Väiksemate objektide puhul pole mehitatud õhusõidukite kasutamine mõistlik või tuleb kasutada paralleelselt ka terrestriali süsteeme. Seega võib näha UAV fotogramm-meetria ka terrestrialise fotogramm-meetria alternatiivi või lisana. Terrestrialise ja UAV süsteemi koos kasutamisel on võimalik kasutada ka näiteks sama kaamerat. (Eisenbeiß 2009)

GNSS-, INS-, stabiliseerimis- ja navigatsiooniseadmete kasutamine tagab lennutrajektooride täpsuse ning seega objekti piisava kaetuse ja samas lubab kasutajal hinnata tulemust täpsust enne lendu. (Eisenbeiß 2009)

Kopter-tüüpi õhusõidukite puhul on võimalik ka vertikaalne õhku tõusmine ja maandumine ning seega pole vaja ka maandumisrada. Lisaks sellele on võimalik salvestada pilte ühes kohas hõljudes ja sel ajal ka kaamera nurka muuta. (Eisenbeiß 2009)

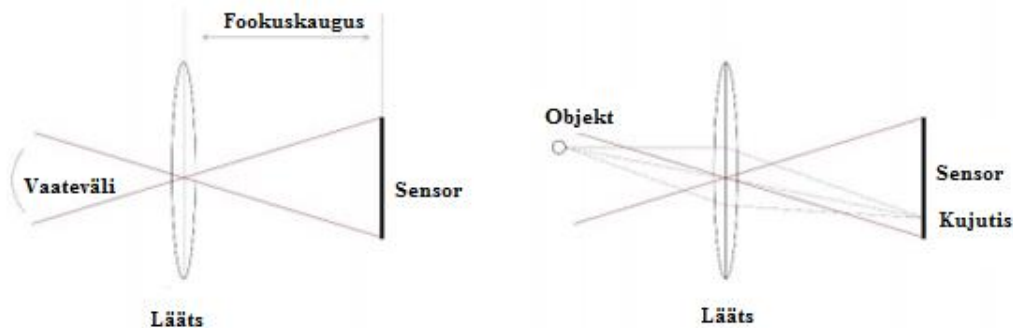
Mehitamata õhusõidukite (eriti odavamate) puhul on kaamerate mass ja mõõdud piiratud, seega kasutatakse tihti kergeid amatöörikaameraid. Selle pärast peab võrreldes suuremate kaameratega tegema rohkem pilte, et katta sama suurt ala ja saavutada võrreldavat resolutsiooni. Lisaks sellele on odavamad kaamerad ebastabiilsemad, mistõttu on ka piltide kvaliteet halvem. Peale selle peavad ka navigeerimisvahendid olema kerged, millest tulenevalt on ka sensorite orienteerimine ebatäpsem. Odavamatel mehitamata õhusõidukitel ei ole enamasti ka nii võimsad mootorid, kui kallimatel, millest tulenevalt on ka maksimaalne lennukõrgus madalam. (Eisenbeiß 2009)

Lisaks neile piirangutele ei oska mehitamata õhusõidukid erinevalt inimestest ootamatutele situatsioonidele intelligentselt reageerida. Odavamatel mehitamata õhusõidukitel ei ole ka kokkupõrke ärahoidmise ja muid turvasüsteeme nagu mehitatud õhusõidukitel. Selle jaoks, et mehitamata õhusõiduki kõiki eeliseid ära kasutada on vaja hästi väljaõpetatud pilooti. Raadiosagedusi, mida kasutavad mehitamata õhusõidukid võivad segada muud avalikus kasutuses olevad seadmed nagu raadio teel juhitud autod või raadiosaatjad. (Eisenbeiß 2009)

### 1.2.1 Digitaalse foto jäädvustamine

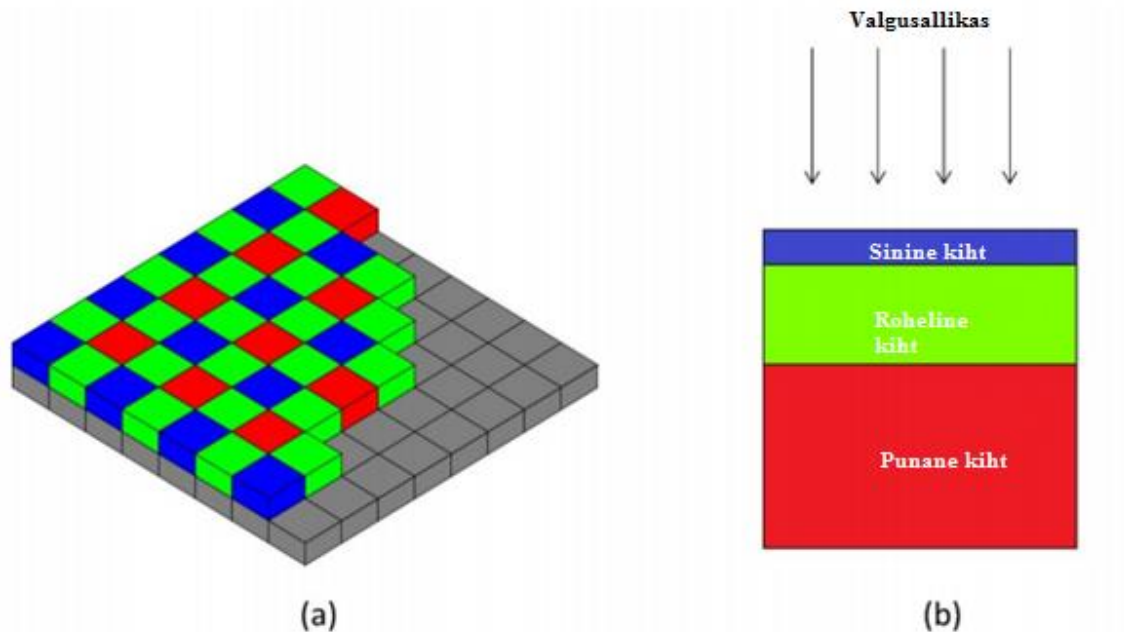
Digitaalse foto saamiseks muudetakse objektilt peegelduv või kiirgav valgus elektriliseks signaaliks, mõõdetakse ning salvestatakse. Salvestatud ala või vaateväli on võrdeline fookuskaugusega  $f$  ja pöördvõrdeline sensori suurusega  $w$  (valem 1.1, joonis 1.5). (Clodius 2007)

$$FoV = 2 \arctan \left( \frac{w}{2f} \right) \approx \frac{w}{f} \quad (1.1)$$



**Joonis 1.5.** Kaamera vaateväli vasakul ja kujutise tekkimine sensorile paremal. (O'Connor 2017)

Sensor on kaamera sees asuv valgustundlik element, mis muudab valguse elektriliseks signaaliks, sensor sisaldab endas pooljuhti (Liba 2005). Sensorile langev valgus tekitab pooljuhis elektrilise laengu, mis mõõdetakse igas sensori osas, tekitades nii tervikliku pildi. Värvide tuvastamiseks kasutab suurem osa kaameraid sensoril värviliste filtrite võrgustikku (CFA – *colour filter array*), mis laseb igale pikslile langeda vaid teatud värvi valgusel, tehes need tundlikuks punasele, sinisele või rohelinele valgusele (joonis 1.6 a). Et saavutada terviklikku värvilist pilti interpoleeritakse kaamera sees sama värvi pikslite kohta käiv info kogu sensori ulatuses. Tavaliselt kasutatakse CFA-d, mille puhul värvid on paigutatud nn Bayer'i mustri järgi, milles pooled pikslid on kaetud roheline filtriga, kuna inimese silm on roheline suhtes tundlikum (joonis 1.6 a). (O'Connor 2017)



**Joonis 1.6.** Värve määratakse tavaliste kaamerate puhul kas värviliste kihtide võrgustikuga CFA (a) või mõnikord ka erinevat värvi kihtidega sensoril (b). (O'Connor 2017)

Mõned kaamerad kasutavad CFA asemel sensoit mille filter koosneb kolmest erinevat värvi kihist (joonis 1.6 b). Sellisel juhul on võimalik värve eristada, erinevat värvi kihtide erineva paksuse tõttu. Sellised sensorid on CFA-tüüpi sensoritest kallimat, kuid on leitud, et nendega on võimalik salvestada teravaid ääri parema kvaliteediga (Hubel jt 2004). Siiski pole sellised sensorid väga levinud ja neid tuleks veel geodeediliste tööde jaoks sobivuse osas testida. (O'Connor 2017)

Väljundina toodavad digikaamerad tavaliselt RAW faili, mis sisaldab kõiki andmeid mida sensori abil koguti. Lisaks sellele teeb kaamera RAW failist töödeldud versiooni, mis salvestatakse 8-bitisesse JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) formaati. JPEG failid on palju väiksemad, kui RAW failid, kuna töötlemise ajal pakitakse andmed kokku. (O'Connor 2017)

Foto valgustatus sõltub kolmest kaamera sättest: ISO ehk valgustundlikkus, ava suurus ja säriaeg. Mida valgustundlikum on sensor, seda paremini on pilt valgustatud, aga samas on pildil ka rohkem müra. Pikema säriajaga jõuab sensorile samuti rohkem valgust, kuid

liikuvad objektid muutuvad uduseks. Ava suurendades väheneb pildi teravussügavus. (O'Connor 2017)

### 1.2.2 Mehitamata õhusõidukite klassifitseerimine

Mehitamata õhusõidukeid saab jaotada õhust kergemateks ja raskemateks ning paindliku, jäiga ja pöörleva tiivaga sõidukiteks (tabel 1.3). Samuti saab neid jaotada mootori olemasolu (tabel 1.3) ja võimsuse järgi ning ka kaalu järgi. (Eisenbeiß 2009)

**Tabel 1.3.** Mehitamata õhusõidukite klassifitseerimine põhiliste omaduste alusel (Eisenbeiß 2009)

	Õhust kergemad	Õhust raskemad		
		Paindlik tiib	Jäik tiib	Pöörlev tiib
<b>Mootorita</b>	Aerostaat	Paraplaan	Plaaner	Rootoriga tuulelohe
		Deltaplaan		
		Tuulelohe		
<b>Mootoriga</b>	Õhulaev	Paraplaan	Lennuk	Ühe rootoriga helikopter
		Deltaplaan	Reaktiivlennuk	Kahe rootoriga helikopter
				Nelja rootoriga helikopter
				Mitme rootoriga helikopter

Pöörleva tiivaga sõidukeid võib omakorda jagada ühe-, kahe-, nelja- ja mitme rootorilisteks (tabel 1.3). Ühe rootoriga süsteemidel on tegelikult üks põhirootor ja sabarootor, põhirootor on aluse õhku tõstmiseks ja sabarootor tagab stabiilsuse ja ei lase õhusõidukil keerlema hakata. Kahe rootoriga süsteemidel on suurem kandevõime ning nad suudavad sama mootorivõimsuse juures kõrgemale tõusta, kuna kogu võimsus kulub aluse õhku tõstmisele. Lisaks sellele on need kergemini juhitud ja ka vaiksemad. Sellised süsteemid on seetõttu umbes 30% efektiivsemad. Samas on kahe rootoriga süsteemidel üks suur puudus – kahte rootorit, mis peavad erinevat pidi pöörlema, ühe võlli küljes kasutamine teeb selle mehaaniliselt väga keeruliseks. Üldiselt on ühe ja kahe rootoriga süsteemid võimsamad, kui mitme rootoriga süsteemid ja seega saab neile monteerida ka rohkem või raskemaid sensoreid. (Eisenbeiß 2009)

Kuna nelja rootoriga süsteemidel on väiksem kandevõime, on need enamasti varustatud kergemate ja odavamate sensoritega (Eisenbeiß 2009). Oma väikeste mõõtmete ja hea juhitavuse tõttu saab nendega lennata nii toas, kui õues (Hoffmann jt 2004). Samas on sellised süsteemid tundlikumad ilmastikuoludele ja nende lennuraadius on väiksem. (Eisenbeiß 2009) Mitme rootoriga süsteemid suudavad tänapäeval kanda juba suuremat lasti ning need on stabiilsemad ja avarii oht on väiksem, kuna ühe rootori tõrke tõttu õhusõiduk veel alla ei kuku (Niethammer jt 2009).

Jäiga tiivaga lennuki puhul ei tulene tõstevõime mitte tiibade liikumisest vaid läbi õhu edasi liikumisest. Mootoriga lennukid liiguvad edasi propelleri või reaktiivmootori jõul. Mehitamata õhusõidukite hulka kuuluvad ka mootorita plaanerid, nende puhul on edasiviivaks ja õhus hoidvaks jõuks õhuvoolud. (Eisenbeiß 2009)

Jäiga tiivaga õhusõidukitega võrreldes suudavad pöörleva tiivaga lennukid objektile lähemal lennata ning on paindlikuma manööverdusvõimega (Bendea jt 2007). Teisest küljest saavad jäiga tiivaga õhusõidukid tavaliselt kauem õhus püsida ning suudavad katta suuremat ala ja lennata suurematel kõrgustel (tabel 1.4). (Eisenbeiß 2009)

**Tabel 1.4.** Erinevate mehitamata õhusõiduki tüüpide eelised ja puudused. 0- kõige madalam hinne, + - keskmine hinne, ++ - parim hinne (Eisenbeiß 2009)

Õhusõiduki tüüp	Ulatus	Vastupidavus	Ilmastiku tundlikkus	Juhitavus
Aerostaat	0	++	0	0
Õhulaev	++	++	0	+
Tuulelohe/ paraplaan/ deltaplaan	+	0	0	0
Plaaner	++	+	+	+
Propelleri/ reaktiivmootoriga lennuk	++	++	+	+
Rootoriga tuulelohe	++	+	0	+
Ühe rootoriga helikopter	+	++	+	++
Kahe rootoriga	+	++	+	++
Nelja rootoriga	0	0	0	++
Mitme rootoriga	+	+	+	++

Erinevalt pöörleva- ja jäiga tiivaga mehitamata õhusõidukitest kontrollitakse ilma mootorita aerostaate ja delta-ning paraplaane kõitega. See tähendab, et lennukõrgus ja kaugus operaatorist on piiratud, horisontaalne liikumisulatus vastab operaatori kõndimisele või mõnel puhul auto liikumisele. Lisaks sellele on sellised süsteemid tundlikumad tuulele. Mootoriga õhulaevadel on aga võimekus väga kaua õhus püsida. Seetõttu on neid otstarbekas kasutada pikaajalist jälgimist eeldavates ülesannetes. Vaatamata sellele on õhulaevade ja ka mootoriga delta- ja paraplaanide puuduseks suur tundlikus ilmastiku suhtes. Lisaks sellele segavad kerest üleval pool asuvad tiivad ja õhupallid GNSS signaali. (Eisenbeiß 2009)

Lisaks eeltoodule klassifitseeritakse mehitamata õhusõidukeid veel hinna, kaalu, tegevusulatuses jms järgi. Peale selle klassifitseeritakse mehitamata õhusõidukite süsteeme veel selle järgi kas nad on varustatud GNSS/INS süsteemiga ja mis täpsust antud süsteem võimaldab. (Eisenbeiß 2009)

### **1.2.3 Mehitamata õhusõidukitega seotud seadusandlus**

Siiaamaani on mehitamata õhusõidukite kasutamist reguleeritud igas riigis eraldi. Siiski on EASA (*European Aviation Safety Agency*) määranud, et üle 150 kg maksimaalse massiga mehitamata õhusõidukid peavad EASA poolt sertifikaadi saama. Väiksemate õhusõidukite kasutamist reguleerivad iga riigi võimud eraldi. (Eisenbeiß 2009)

Paljudes Euroopa riikides on mehitamata õhusõidukeid lubatud äritegevuses kasutada väga rangetel tingimustel. Suuremas osas riikides on enne mehitamata õhusõiduki käitamist vaja saada kohalikult riiklikult lennuametilt luba või litsents. Lisaks sellele on olulised ka eraelu puutumatusel ja isikuandmete kaitsel ning tuleb järgida nendega seotud Euroopa ja siseriiklike õigusnõudeid. (Kutselistele kasutajatele 2018)

Mitmed riiklikud lennuametid on vastu võtnud lennuohutuse õigusakte, millega reguleeritakse mehitamata õhusõidukite kasutamist antud riigi õhuruumis. Õnnetuse korral peab mehitamata õhusõiduki eest vastutav isik, kelleks on juht, omanik, käitaja vms, hüvitama põhjustatud kahjud. Sellepärast nõutakse Euroopa lennundusõiguse alusel, et kutselised mehitamata õhusõiduki kasutajad oleksid kindlustatud. (Kutselistele kasutajatele 2018)

Eestis sätestatud seaduste kohaselt tohib mehitamata õhusõidukit mittekontrollitavas õhuruumis käitada madalamal, kui 500 jalga (umbes 150 meetrit) maa- või merepinnast nii, et see ei ohustaks inimesi, vara ega teisi õhusõidukeid. Mittekontrollitavas õhuruumis kõrgemal, kontrollitavas õhuruumis või lennuinfofoonis käitamiseks peab olema Lennuameti ühekordne luba. Mehitamata õhusõiduki käitamisel peab arvestama lennuliiklusteenindusüksuse antud juhiseid ja sõltuvalt õhuruumi klassist saada selleks eelnevalt lennujuhtimisüksuse luba. (Riigisisised lennureeglid ja erandid ning erisused komisjoni rakendusmääruses (EL) nr 923/2012 sätestatud lennureeglitest 2015, § 7 lg 1-3)

Õhuruumiosad, kus peab olema Lennuameti ühekordne luba (Käitaja meelespea 2018):

1. Kontrollitav õhuruum (Tallinn, Tartu ja Ämari) ja lennuinfofoonid (Pärnu, Kuressaare ja Kärkla)
2. Keelu-, piirangu-, ajutiselt eraldatud, ajutiselt reserveeritud, langevarjuhüpete, motoparaplaanide ja tundliku faunaga alad.
3. Kõikjal kõrgemal, kui 500 jalga (umbes 150m) maapinnast

Lennuamet väljastab mehitamata õhusõiduki käitamiseks vajaliku ühekordse loa kuni üheks aastaks. Alades, kus on nõutud ühekordne luba, tuleb iga lend Lennuametiga kooskõlastada. Rahvakogunemisel või üritustel mehitamata õhusõiduki kasutamiseks peab olema ürituse korraldaja luba. Lisaks sellele on seatud mitmeid piiranguid inimeste pildistamisele filmimisele. (Käitaja meelespea 2018)

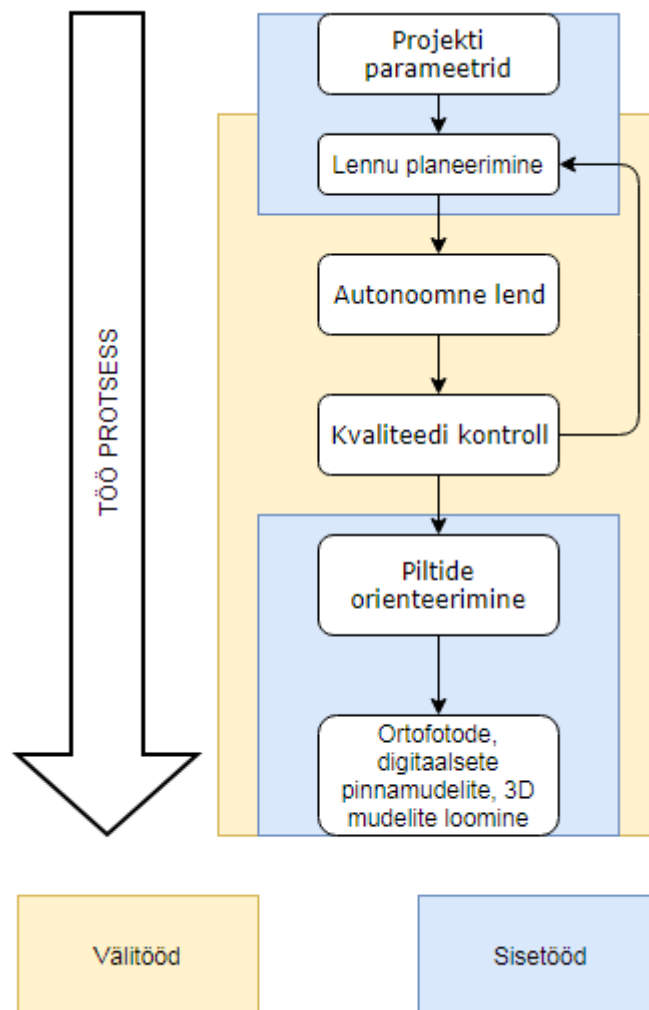
#### **1.2.4 Fotogramm-meetrilised tööd mehitamata õhusõidukite andmete põhjal**

**Tööprotsess** koosneb tavaliselt Eisenbeiß, 2009 järgi järgmistest osadest:

- Projekti parameetrite välja selgitamine
- Lennu planeerimine
- Autonoomne lend andmete kogumiseks
- Andmete kvaliteedi kontroll
- Piltide orienteerimine parda GNSS ja INS andmete põhjal
- Ortofotode, digitaalsete pinnamudelite ja 3D mudelite loomine



Kasutatavad seadmed, meetodid ja tarkvara pannakse paika **parameetrite välja selgitamise** käigus. Erinevad tööprotsessi osad võivad olla osaks erinevates tarkvarades toimuvast protsessist. Joonisel 1.7 on näidatud, mis järjekorras erinevad toimingud toimuvad. Erinevate sammude vahel sujuvaks informatsiooni vahendamiseks on erinevates tarkvarades funktsioonid loodud. (Eisenbeiß 2009)



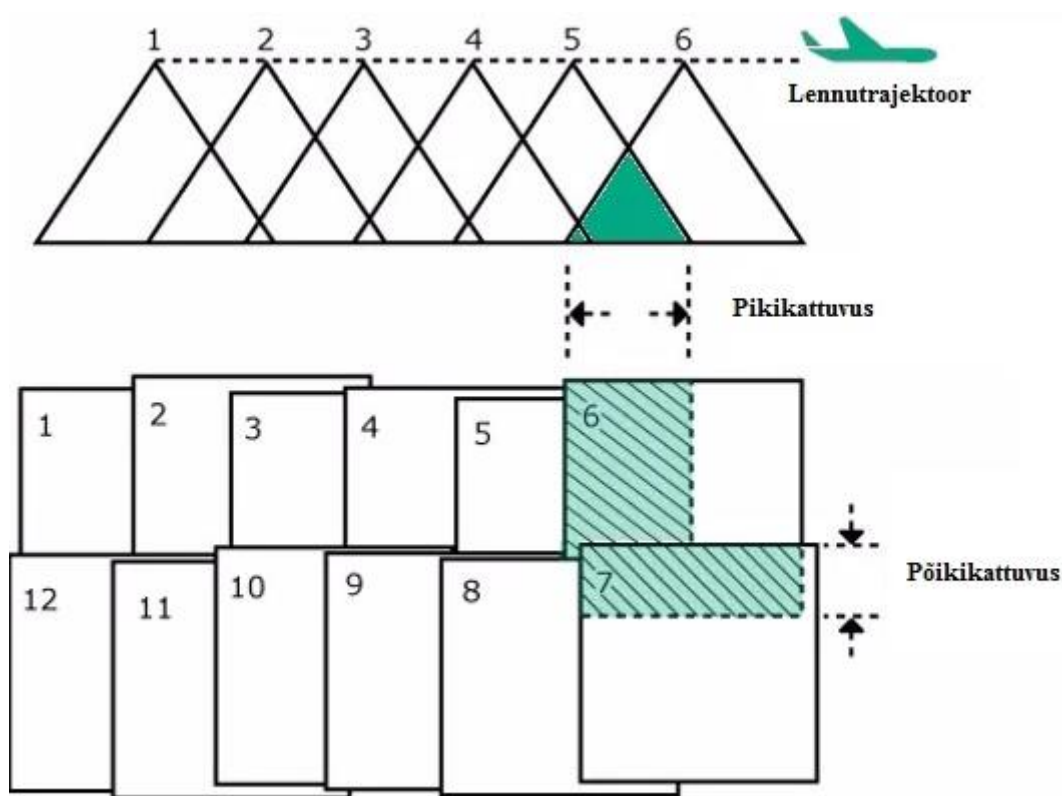
**Joonis 1.7.** Mehitamata õhusõidukilt kogutud andmete kogumise ja töötlemise protsess. (Eisenbeiß 2009)

**Lennu planeerimise** käigus tuleb automaatselt piltide kogumiseks lennu trajektoori eelnevalt välja arvutada. Selle protsessi juures on oluline arvestada projekti parameetreid

nagu objekti iseärasused, saadava tulemuse formaat, kaamera sensori omadused, õhusõiduki tüüp ja lennu piirangud. (Eisenbeiß 2009)

Vajadusel tuleb enne **autonoomset lendu** paigaldada ka maapealseid tähiseid, mille koordinaate andmetöötluse käigus kasutatakse. Lennu käigus võib ka õhku tõusmine ja maandumine toimuda autonoomselt, kuid need osad võivad olla ka puldiga juhitud. Autonoomse lennu ajal toimub piltide jäädvustamine ja salvestamine ning lisaks toimub GNSS ja INS süsteemi olemasolul ka asukoha ja asendi andmete salvestamine. Täpsemate orientatsiooni andmete puhul võib kasutada vähem maapealseid tähiseid (Cramer 2001). Aladel, kuhu ei saa paigaldada spetsiaalseid tähiseid, võib selleks kasutada ka olemasolevaid ära tuntavaid objekte, nagu näiteks teekattemärgistus. Nende punktide koordinaadid võib määrata enne või pärast lendu, kasutades elektrontahhümeetrit või GNSS vastuvõtjat. (Eisenbeiß 2009)

Piltide pikikattuvus peaks olema vähemalt 80% ja põikikattuvus vähemalt 60% (joonis 1.8). Et saavutada võimalikult head geomeetrilist täpsust ja georeferentseerimist, tuleks objektile paigutada vähemalt kümme tähist. (Agisoft PhotoScan User ... 2018)



**Joonis 1.8.** Aerofotode piki- ja põikikattuvus. (Know Basics about ... 2018)

**Kvaliteedi kontroll** lennu ajal ja vahetult pärast seda on väga tähtis, kuna andmete kogumise aeg on tihti piiratud ja hiljem seda korrata ei saa. Objektil vaadatakse kiirelt üle vähendatud pildid ning jälgitakse, et neil oleks kujutatud õige ala. Põhiline kvaliteedi kontroll koosneb tähiste koordinaatide võrdlusest ja esimeste tulemuste genereerimisest objektil või pärast seal käimist. Uus lend tuleb sooritada juhul, kui mõõdetud ala ei kattu planeerituga, mõned pildid on salvestamata jäänud, mõned alad on pildistamata, piltidel ei ole piisavat ülekatet või esialgsed tulemused näitavad suurt viga. (Eisenbeiß 2009)

Pardal olevate GNSS ja INS süsteemidest saadud andmete põhjal **piltide orienteerimine** võib olla nii aega, kui ka raha säästev (Eisenbeiß 2009). Nende andmete kasutamisel võib vähendada maapealsete tähiste arvu (Cramer 2001).

Pildid orienteeritakse üksteise suhtes nõ sidumispunktide abil. Selle meetodi tõhusus sõltub piltide kvaliteedist ja maastikust. Heade tingimuste puhul on võimalik pildid ka automaatselt orienteerida. Paremate tarkvarade puhul arvutatakse automaatselt välja ka orienteerimise viga ja kuvatakse suurimat viga põhjustavad fotod. Halbade tingimuste ning odavama tarkvara puhul tuleb sidumispunktid määrata fotodel manuaalselt, mis on üsna aeganõudev töö. (Eisenbeiß 2009)

**Ortofotode ja mudelite loomiseks** on tänapäeval loodud mitmeid erinevaid tarkvarapakette. Kui pildid on orienteeritud toimub maapinna tuvastamine. Teades kaamera parameetreid on võimalik piltidel jäädvustatud olukord digitaalselt taastada automaatsete või interaktiivsete võimalustega. Interaktiivsete võimaluste puhul tekivad hõredad punktipilved, mida on vaja struktureerida ja parandada, et saada täpset kolmemõõtmelist andmestikku. Automaatsete meetodite puhul luuakse tihe punktipilv, mis kirjeldab mõõdistatud ala. Saadud punktipilve tuleb tavaliselt hõrendada ja interpoleerida ning lihtsustada, et saada realistlik tulemus. Erinevad tarkvarad kasutavad selle jaoks erinevat tööprotsessi ja algoritme. Algoritm peaks olema piisavalt võimekas, et kirjeldada maapinna iseärasusi piisavalt täpselt. Siledade pindade puhul võiks kasutada väiksemat punktitiheidust ja konarlikemate puhul suuremat punktitiheidust. (Remondino jt 2011)

Kui punktipilv on loodud saab selle avada juba vastavalt vajadusele näiteks mõnes joonestustarkvaras.

### 1.2.5 Ülevaade Eestis tehtud uurimistöödest

Eestis on läbi viidud mitu mehitamata õhusõidukitega seotud geodeesia ja geograafia alast uurimistööd. Enamasti on tegu bakalaureuse- ja magistrیتöödega ning kõige rohkem on uuritud tulemuste koordinaatide plaanilist ja kõrgusliku täpsust. Järgnevalt antakse ülevaade mõnest tööst, mis haakuvad ka käesoleva uurimistööga.

2018. aastal kaitses **Romet Kõök** Tallinna Tehnikaülikoolis magistrیتööd, mille raames viidi läbi fotogramm-meetrilisi mõõdistusi mehitamata õhusõidukilt Võõbu katselõigul (joonis 1.9). Eesmärk oli hinnata antud meetodite abil moodustatud pinnamudelite vertikaaltäpsusi. Katsetati erinevaid lennukõrgusi, tähiseid ja kaameraid ja jälgiti erinevate tegurite mõju tulemustele. Erinevatel viisidel saadud pinnamudeleid kasutati mahtude arvutusel ning tulemusi võrreldi erinevate nõuetega. (Kõök 2018)



**Joonis 1.9.** Võõbu katselõik Phantom Vision Plus pardalt pildistatuna. (Kõök 2018)

Saadud tulemusi võrreldi laserskanneri ja GNSS seadmega kogutud andmetega. Uurimuses kasutatud õhusõidukid olid DJI Phantom 2 Vision Plus ja DJI S1000, mille pardal olid vastavalt kaamerad FC200 (14Mpix) ja Sony NEX-7 (24 Mpix). (Kõök 2018)

Enne õhusõidukilt mõõtmist paigaldati objektile tähised, mis mõõdeti samuti GNSS seadme abil. (Köök 2018)

Uurimuse käigus sai selgeks, et kõrgema lahutusvõimega kaamera fotodest moodustatud pinnamudel oli tunduvalt täpsem võrreldes ebakvaliteetsema kaameraga tehtud piltide põhjal moodustatud pinnamudeliga. (Köök 2018)

Tartu Ülikoolis 2016 aastal **Kaspar Huule** poolt kaitstud bakalaureusetöö eesmärk oli uurida mehitamata õhusõidukilt saadud andmetest fotogramm-meetriliselt saadud kolmemõõtmeliste mudelite täpsust ja kvaliteeti. Töös antakse ülevaade mehitamata õhusõidukite ajaloost, ehitusest ja põhilistest kasutusalaadest. Lisaks sellele kirjeldatakse fotogramm-meetria tööetappe. (Huul 2016)

Andmete kogumine toimus 2015 aasta kevadel ja sügisel Raadi karjääris (joonis 1.10). Kevadel tehtud piltidest kasutati 189 ja sügisel tehtud piltidest 225 fotot. Mõlema andmete kogumise andmetest loodi eraldi mudel. Töös kasutati Tartu Ülikooli geograafia osakonna kaheksa rootoriga mehitamata õhusõidukit, mille pardal oli Canon EOS 550D kaamera. Andmete töötamiseks kasutati Agisoft ja Arcmap tarkvara. Ortofotode täpsust hinnati visuaalselt, ruutkeskmise vea, Helmerti transformatsiooni ja tugipunktide omavaheliste kauguste abil. Kõrgusmudelite täpsust hinnati Maa-ameti LIDAR andmetega võrreldes. (Huul 2016)





**Joonis 1.10.** Kevadistest andmetest moodustatud ortofoto Maa-ameti aluskaardil. (Huul 2016)

Töö käigus leiti, et ortofotod olid võrdlemisi täpsed, kevadise puhul oli tugipunktide omavaheliste kauguste keskmine viga 4 cm. Kõrgusmodelite võrdlusel ilmnas süstemaatiline viga, mis tulenes tugipunktide mõõtmisest. Uurimistöö autor leidis, et antud temaatikat võiks edasi uurida erinevatel maastikel. (Huul 2016)

**Jaano Berg-Jürgens** kaitses 2015 aastal Eesti Maaülikoolis magistritööd mille, eesmärk oli mehitamata lennukilt kogutud fotode ortofotomosaiigi geomeetrilist täpsust erinevate tasandusmeetodite puhul. (Berg-Jürgens, 2015)

Uurimistöös kasutati Tartu linna mehitamata lennukiga aeromõõdistamise I etapi tulemusi, mille käigus mõõdistati Ihaste ja Annelinna linnaosades. Aero fotod koguti 2014 aasta sügisel ning pildistatud ala pindala oli 3,5 km<sup>2</sup>. Kogu tehti 425 aerofotot ning piksli suuruseks maapinnal oli 4,7 cm. Täpsuse hindamiseks mõõdistati pildistatud alal 30- tugi ja

kontrollpunkti. Mõõtmisel kasutati Trimble R4 ja 5800 GNSS vastuvõtjaid. Pildistamine toimus OÜ ELI-le kuuluva mehitamata lennuki MUST Q (joonis 1.11) pardalt. Pardal oli Panasonic DMC-GX1 kaamera ning 3D Robotics GNSS ja IMU seade. Saadud andmeid töödeldi Pix4D tarkvaras. (Berg-Jürgens, 2015)



**Joonis 1.11.** Uurimistöös kasutatud mehitamata lennuk MUST Q. (Foto: Natalja Liba)

Loodi kolm erineva tasandusega ortofotomosaiiki ning nende geomeetrilise täpsuse kontrolliks kasutati GNSS seadmega mõõdetud kontrollpunkte, mida võrreldi ortofotomosaiigilt mõõdetud koordinaatide keskmisega. Täpsust hinnati Gaussi keskmise ruutvea valemi abil. (Berg-Jürgens, 2015)

Töö tulemustest selgus, et keskmisteks ruutvigadeks olid automaatse projekti puhul 0,664 m, poolmanuaalse puhul 0,090 m ja manuaalse puhul 0,079 m. Tulemustest järelitati, et ilma tugipunkte rajamata ei saa piisavalt täpset ortofotomosaiiki. Samas olid poolmanuaalse ja



manuaalse projekti keskmised ruutvead üsna võrdsed. Tulevikus sooviti uurida mehitamata lennukite kasutamist kõrgusmodelite loomisel näiteks maapealsete kaevanduste mahtude kindlaksmääramiseks. (Berg-Jürgens, 2015)

### 1.2.6 Ülevaade mujal maailmas tehtud uurimistöödest

Mujal maailmas on mehitamata õhusõidukite fotogramm-meetriaga seonduvaid uurimistöid läbi viidud rohkem ning uuritud on ka nende abil mahtude arvutamist. Järgnevalt kirjeldatakse mõnda, mis haakuvad ka käesoleva uurimistööga.

Ameerika Ühendriikides, Arkansases 2017 aastal **Richard Kramer Rhodes**'i läbi viidud töös uuriti odava mehitamata õhusõiduki kasutamist kolmemõõtmeliste modelite loomisel alternatiivina traditsioonilistele mõõdistusviisidele. Uuriti erinevaid andmete kogumise ja töötlemise meetodeid. Mahtude täpsuste hindamiseks võrreldi saadud tulemusi referentsmõõtmiste ja objektide projektijärgsete ruumaladega. (Rhodes 2017)

Kasutatud õhusõiduk oli 3D Robotics Solo, millel on neli rootorit. Kasutatavaks kaameraks oli GoPro Hero 4 silver edition. Maapealsed kontrollpunktid mõõdeti Leica GS15s GNSS vastuvõtjatega, ning kontrollpunktides kasutati Agisofti poolt pakutavaid tähiseid. Töötluse käigus kasutati Agisoft Photoscan, ESRI ArcMap ja Microsoft Excel. (Rhodes 2017)

Esimene uurimisobjekt oli heinamaa, kus oli mitmeid teadaoleva suurusega ümmargusi heinapalle. Teine objekt oli reoveepuhastusjaam, kus oli mitmeid hooneid ja mahuteid, millest suurima läbimõõt oli 72 meetrit ja kõige väiksematel 3,5 meetrit (joonis 1.12). (Rhodes 2017)

Tulemuste põhjal võib ennustada mehitamata lennukite kasutamise suurenemist antud valdkonnas, kuna hinna ja ajavõit on märkimisväärne. 13 mõõdistatud objektist kuue puhul oli suhteline viga väiksem, kui viis protsenti. Ülejäänud seitsmest objektist neljal oli viga üle 15 protsenti ning kolme puhul jäi viga 5% ja 15% vahele. (Rhodes 2017)





**Joonis 1.12.** Teine uurimisobjekt maapealsete kontrollpunktidega. (Rhodes 2017)

Tööst järeldus, et sobivates tingimustes on mehitamata õhusõiduk väga kasulik töövahend erinevate objektide mahtude mõõtmiseks. Uurimistöö kokkuvõttes leiti, et edaspidi tuleks uurida, millised on erinevateks töödeks optimaalsed seadmed ning millised on mõõdetavate objektide soodsad ja ebasoodsad omadused. (Rhodes 2017)

2014 aastal viidi Kanadas läbi uurimus, mille autoriteks olid **Mohamar Moussa Ouédraogo, Aurore Degré, Charles Debouche ja Jonathan Lisein**. Uurimistöö käigus hinnati terrestrialse laserskaneerimise ja kaameraga varustatud mehitamata õhusõidukite kasutamist kõrge resolutsiooniga DEM mudelite koostamiseks vajalike andmete kogumiseks väikeses vesikonnas (12 ha). (Ouédraogo jt 2014)

Erinevate meetodite täpsuse hindamiseks mõõdeti piirkonnas GNSS seadme abil 1098 kontrollpunkti. Terrestrialse laserskanneriga mõõdeti objekt 14 seisupunktist ning saadud andmetest koostati 1x1m võrgustikuga digitaalne kõrgusmudel. Mehitamata õhusõidukilt kogutud fotosid töödeldi Agisoft PhotoScan ja MicMac tarkvaraga ning selle tulemusel loodi kaks 1x1 meetrise võrgustikuga digitaalset kõrgusmudelit. (Ouédraogo jt 2014)

Kontrollpunktidega võrdlusel selgus, et laserskaneerimise andmetest saadud DEM oli kõige täpsem, selle keskmine ruutviga oli 4,5 cm, järgnesid MicMac tarkvara kasutades saadud DEM 9 cm keskmise ruutveaga ja Agisofti kasutades saadud DEM 13,9 cm keskmise ruutveaga. (Ouédraogo jt 2014)

Agisofti tarkvara abil saadud DEM puhul täheldati suuremaid vigu 15 kuni 52 sentimeetrini, mis viitab süstemaatilistele vigadele. Kuigi MicMac tarkvara kasutades saadud kõrgusmudel oli üsna täpne esines ka sellel just madalamatel alades süstemaatiliselt suuremaid vigu. (Ouédraogo jt 2014)

Töö kokkuvõttes leiti, et terrestrilise laserskaneerimisega võrreldes on mehitamata õhusõidukid paljulubavad töövahendid andmete kogumiseks, kuna need on võrdlemisi odavad ja üsna paindlikud vahendid. Siiski oleks vaja fotogramm-meetrilist töötlust edasi arendada, et eemaldada suuremaid vigu. (Ouédraogo jt 2014)

2015 aastal viidi **C. Arango ja C. A. Morales**'i poolt läbi uurimistöö, milles võrreldi elektrontahhümeetri ja mehitamata õhusõiduki kasutamist pinnase puistangu mahu arvutamiseks vajalike andmete kogumisel. (Arango, Morales 2015)

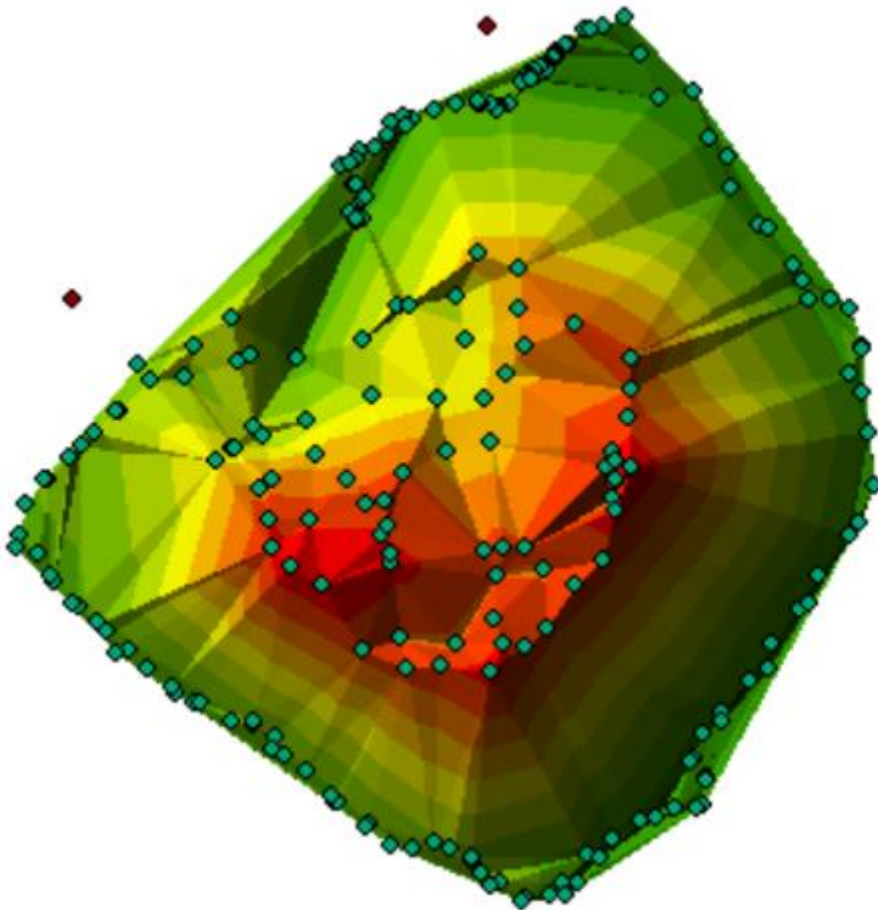
Andmeid koguti tahhümeetrilise mõõtmise käigus ning mehitamata lennukilt pildistades. Tahhümeetriga kogutud andmetest moodustati ArcGIS tarkvara abil TIN- mudel (joonis 1.13) ning mehitamata õhusõidukilt kogutud fotodest moodustati mudel Pix4D tarkvara abil. (Arango, Morales 2015)

Kasutatud elektrontahhümeeter oli Leica TS-02 ja see orienteeriti GNSS mõõtmise abil saadud punktide abil. Mehitamata õhusõidukiks oli DJI Phantom 2 vision plus, mõõtmise käigus sooritati kaks 14 minuti pikkust lendu. Mudeli loomisel kasutati ka maapealseid markereid, mis mõõdeti GNSS seadme abil. (Arango, Morales 2015)

Saadud tulemusi võrreldi puistangus oleva materjali tegeliku mahuga, andmed saadi objektile töötavate inseneride käest. Puistangu tegelik maht oli 11500 kuupmeetrit. (Arango, Morales 2015)

Andmete võrdluse käigus selgus, et elektrontahhümeetriga saadud andmete põhjal loodud mudeli erinevus referentsandmetest oli 2,88% ja mehitamata õhusõiduki andmetest loodud

mudeli erinevus oli -0,67%. Tulemustest järeldati, et mehitamata õhusõidukilt teostatud mõõtmised olid täpsemad. (Arango, Morales 2015)



**Joonis 1.13.** Tahhümeetri andmetest loodud TIN mudel pealtvaates. (Arango, Morales 2015)

Lisaks sellele võrreldi, erinevate meetoditega andmete kogunemisele kulunud aega ja jõuti järeldusele, et tahhümeetrilisele mõõdistamisele kulus umbes 6 korda rohkem aega, kui mehitamata õhusõiduki abil mõõdistamisele. (Arango, Morales 2015)

**P. L. Raeva, S. L. Filipova, D. G. Filipov**'i poolt 2016 aastal Tšehhis läbi viidud, uurimistöö käigus hinnati mehitamata õhusõiduki kasutamist mahuarvutuste tegemiseks võrreldes tavapäraste GNSS mõõtmistega. Selle jaoks valiti sobiv karjäär ning mõõdeti selle

laoplat, koos astangute tasapindadega RTK GNSS meetodil. Seejärel kaardistati ala mehitamata õhusõiduki abil. (Raeva jt 2016)

Töös kasutati mehitamata lennukit eBee (joonis 1.14), mille pardal oli Canon S110 kaamera ning GNSS vastuvõtja fotodele esialgsete koordinaatide määramiseks. Kontrollmõõtmisteks kasutati Leica viva GS08 GNSS vastuvõtjat. Mõõdistatud karjäär asub Bulgaaria pealinnast Sofiast 120 kilomeetri kaugusel kirdes. Karjääris kaevandatakse savi ning seda hoitakse teatud aja vältel kihtidena laoplatil. (Raeva jt 2016)



**Joonis 1.14.** Töös kasutatud mehitamata lennuk senseFly eBee. (Raeva jt 2016)

Lennu käigus tehti 417 pilti, piksli suurus maapinnal oli 2,8 cm ja piltide kattuvus mõlemat pidi oli 75%. Fotogramm-meetrilise mudeli loomiseks paigaldati ka 7 tähist ning mõõdeti need samuti GNSS seadme abil. Piltide töötlemiseks kasutati tarkvara Pix4D, ning mahuarvutused tehti tarkvaras Civil 3D. (Raeva jt 2016)

Töös on välja toodud, et mitmes riigis on mahtude mõõtmise nõutud täpsus ei tohi erineda üle 3% tegelikust. Tulemuseks saadi kahe mõõtmise vahel erinevuseks 143,99 m<sup>3</sup>, mis oli antud objektile 1,1%, seega mahtus välja toodud piiridesse. Kokkuvõttes tuuakse välja, et fotogramm-meetriline andmete kogumine võttis tunduvalt vähem aega, kui GNSS meetodil mõõtmine. Leitakse, et mehitamata õhusõidukite kasutamine karjäärides mahtude leidmine on õigustatud, eriti tänu asjaolule, et mehitamata õhusõidukite ja fotogramm-meetria tehnoloogia areneb pidevalt. (Raeva jt 2016)

## **2. MATERJAL JA METOODIKA**

### **2.1 Uurimistöö objekt ja kasutatud vahendid**

Uurimistöö eesmärk oli välja selgitada, kas mehitamata õhusõidukilt pildistatud fotodest loodud mudeli abil on võimalik täita mahtude arvutamiseks seatud nõudeid. Lisaks sellele uuriti, kuidas mõjub tulemusele erineva hinnaklassi mehitamata õhusõidukite kasutamine, erinevate ja erineva arvu tähiste kasutamine ning objektide omadused.

Uurimistöö jaoks valiti välja kaks objekti, kus olid ladestatud erinevate omadustega materjalid. Lisaks sellele oli ühel objektil olev puistang korrapärase ning teisel ebakorrapärase kujuga. Kahe Eesti Maaülikooli magistritöö jaoks toimusid mõlemal objektil RTK GNSS mõõtmised, fotogramm-meetrilised lennud mehitamata õhusõidukitega ning terrestriline laserskaneerimine.

#### **2.1.1 Uurimistöö objekt**

Esimene objekt oli Läänemaal, Laiküla turbamaardlas asuv turbaaun ja teine objekt oli Järvamaal, Karude karjääris asuv purustatud kruusa puistang (joonis 2.1).

Esimene välja valitud objekt asub Läänemaal, Lääne-Nigula vallas, Risti–Virtsu–Kuivastu–Kuressaare maantee ääres (joonis 2.2). Turbarmaardlas valiti välja üks korrapärase kujuga turbaaun (joonis 2.7). Turbaauna pindala oli 463 m<sup>2</sup>.

Teine objekt asub Järvamaal, Paide linnas, Mustla-Nõmme külas (joonis 2.4). Karjääris valiti välja üks ebakorrapärase kujuga purustatud kruusa puistang (joonised 2.3, 2.11). Puistangu pindala oli 394 m<sup>2</sup>.





**Joonis 2.1.** Laiküla turbaraba asukoht punasega ja Karude karjääri asukoht sinisega tähistatult. (Maa-ameti kaardirakendus 2018)



**Joonis 2.2.** Vaade Laiküla turbamaardlale, pildistatud Aibot X6 pardalt.



**Joonis 2.3** Aerofoto Karude karjääris välja valitud objektist, pildistatud DJI Phantom 4 pro v2.0 pardalt.

Laiküla turbamaardla ja Karude karjäär on praegu aktiivselt kasutusel. Nii turbaaunad, kui ka kruusakarjäärid on tüüpilised objektid, mille mahtusid geodeetidel igapäevaselt mõõta tuleb.

### **2.1.2 Kasutatud riistvara**

Objektide kontuuride ja tähiste mõõtmiseks ning laserskanneri orienteerimiseks kasutati **Trimble R4-3 GNSS vastuvõtjat ja Trimble TSC3 väliarvutit**. Antud vastuvõtjaga on võimalik kasutada nii GPS, Glonass, Galileo kui ka BeiDou satelliite. Antud vastuvõtja staatilise positsioneerimise horisontaalne täpsus on 3 mm ja vertikaalne 3,5 mm ning RTK positsioneerimise täpsused vastavalt 8 ja 15 mm. (User Guide: Trimble 2013) Vastuvõtja spetsifikatsioonid on toodud lisas 1.



Mõlemad objektid skaneeriti **Trimble SX10** (joonis 2.4) seadme abil. Tegemist on skaneeriva tahhümeetriga ning sellega on võimalik instrument igas seisupunktis orienteerida ning punktide pilv automaatselt objektile vastavas koordinaatide süsteemis kokku panna. Antud instrumendi tahhümeetiline nurgamõõtmise täpsus on 1 sekund ja kauguse mõõtmise täpsus prismaga 1 mm. Skanner töötab pöörleva prisma põhimõttel ning mõõtmise sagedus on 26,6 kHz. Skanneri mõõtmise ulatus on 0,9 kuni 600 m ning skaneeritud punkti koordinaatide täpsus skannerist 100 m kaugusel on 2,5 mm. Kiire läbimõõt 100 m kaugusel on 14 mm. (Trimble SX10 Scanning ... 2017) Trimble SX10 spetsifikatsioonid on toodud lisas 1.

**DJI Phantom 4 Pro v2.0** (joonis 2.5) on võrdlemisi odav tavakasutajale kättesaadav mehitamata õhusõiduk, mis maksab umbes 2000 eurot. DJI on Hiina ettevõtte, mis tegelebki peamiselt mehitamata õhusõidukite tootmise ja arendamisega. Tegemist on lihtsasti käsitletava seadmega, mida saab ühendada ka nutitelefoni. Õhusõiduk on nelja rootoriga kopteri tüüpi ning sellel on andurid, mis aitavad vältida õnnetusi ja kokkupõrkeid. Kaamera eraldusvõime on 20 MP ja fookuskaugus 8,8 mm. (Phantom 4 Pro ... 2018) DJI Phantom 4 Pro ja integreeritud kaamera spetsifikatsioonid on toodud tabelis 2.1 ja lisas 1.



**Joonis 2.4.** Skaneeriv tahhümeeter Trimble SX10 Laiküla turbamaardlas.



**Tabel 2.1.** DJI Phantom 4 pro v2.0 ja Aibotix Aibot X6 ja nende kaamerate spetsifikatsioonid (Phantom 4 Pro ... 2018, Aibot X6 2018, ILCE-7RM2 Full Specifications ... 2018)

	<b>DJI Phantom 4 Pro v2.0</b>	<b>Aibotix Aibot X6</b>
<b>Mõõdud</b>	Läbimõõt 35 cm	105 x 105 x 45 cmm
<b>Kaal</b>	1,375 kg (koos kaameraga)	3,4 kg
<b>Kandevõime</b>	-	2 kg
<b>Lennuaeg</b>	Kuni 30 min	Kuni 20 min
<b>Maksimaalne kiirus</b>	72 km/h, positsioneerimisega 50 km/h	40 km/h
<b>Tõusmise kiirus</b>	6 m/s, positsioneerimisega, 5m/s	8 m/s
<b>Rootoreid</b>	4	6
<b>Kaamera</b>	Integreeritud 1'' CMOS 20 MP	Sony ILCE-7RM2
<b>Eraldusvõime</b>	5472 × 3648 pikslit (20 MP)	7952 x 5304 pikslit (42,4 MP)
<b>Fookuskaugus</b>	8,8 mm	35 mm
<b>Sensori suurus</b>	Diagonaal 1 toll	1,4 x 0,9 tolli
<b>Pildi formaat</b>	JPEG, DNG (RAW)	JPEG, RAW



**Joonis 2.5.** DJI Phantom 4 Pro v2.0 vasakul ja Aibotix Aibot X6 paremal Laiküla turbamaardlas. (Foto: Mart Rae)

**Aibotix Aibot X6** (joonis 2.5) on spetsiaalselt fotogramm-meetrilisteks töödeks mõeldud mehitamata õhusõiduk. Tegemist on Saksamaa toodanguga ning selle hind on umbes 20000 eurot. Aibot X6'l on kuus rootorit ning see suudab lennata kuni 500 meetri kõrgusele ja kanda kuni kahekilogrammist lasti. (Aibot X6 2018) Pardal kasutati Sony ILCE-7RM2 kaamerat. Tegemist on kaameraga mille eraldusvõime on 42,4 MP ja fookuskaugus 35 mm

(ILCE-7RM2 Full Specifications ... 2018). Aibot X6 ja Sony ILCE-7RM2 spetsifikatsioonid on toodud tabelis 2.1 ja lisa 1.

Andmetöötluse käigus kasutati autori sülearvutit ja Eesti Maaülikooli fotogramm-meetria labori arvutit.

### 2.1.3 Kasutatud tarkvara

Aibot X6 lennu planeerimiseks kasutati Aibotixil **AiProFlight** tarkvara, mis on Aibotixi poolt ja selle ettevõtte mehitamata lennukitega ühilduv tarkvara. DJI Phantom 4 Pro lennu planeerimiseks kasutati **DroneDeploy** tarkvara, mis on spetsiaalselt välja töötatud mehitamata õhusõidukitega erinevate tööde tegemise lihtsustamiseks.

Laserskannerist saadud punktipilv puhastati **Trimble Business Center** tarkvaras. Nii laserskannerist, kui ka fotodest koostatud punktipilved konverteeriti **Autodesk Recap 2019** tarkvaras. Autodesk Recap on ettevõtte Autodesk poolt spetsiaalselt punktipilvede töötlemiseks loodud tarkvara.

Fotode orienteerimine ja punktipilvede tootmine toimus **Agisoft PhotoScan Professional 1.4.0** tarkvaras. Agisoft on Venemaa ettevõtte, mis tegeleb peamiselt fotogramm-meetrilise tarkvara arendamisega.

Joonestustarkvaras **Autodesk Civil 2019** loodi punktipilvedest mudelid ja arvutati nende mahud.

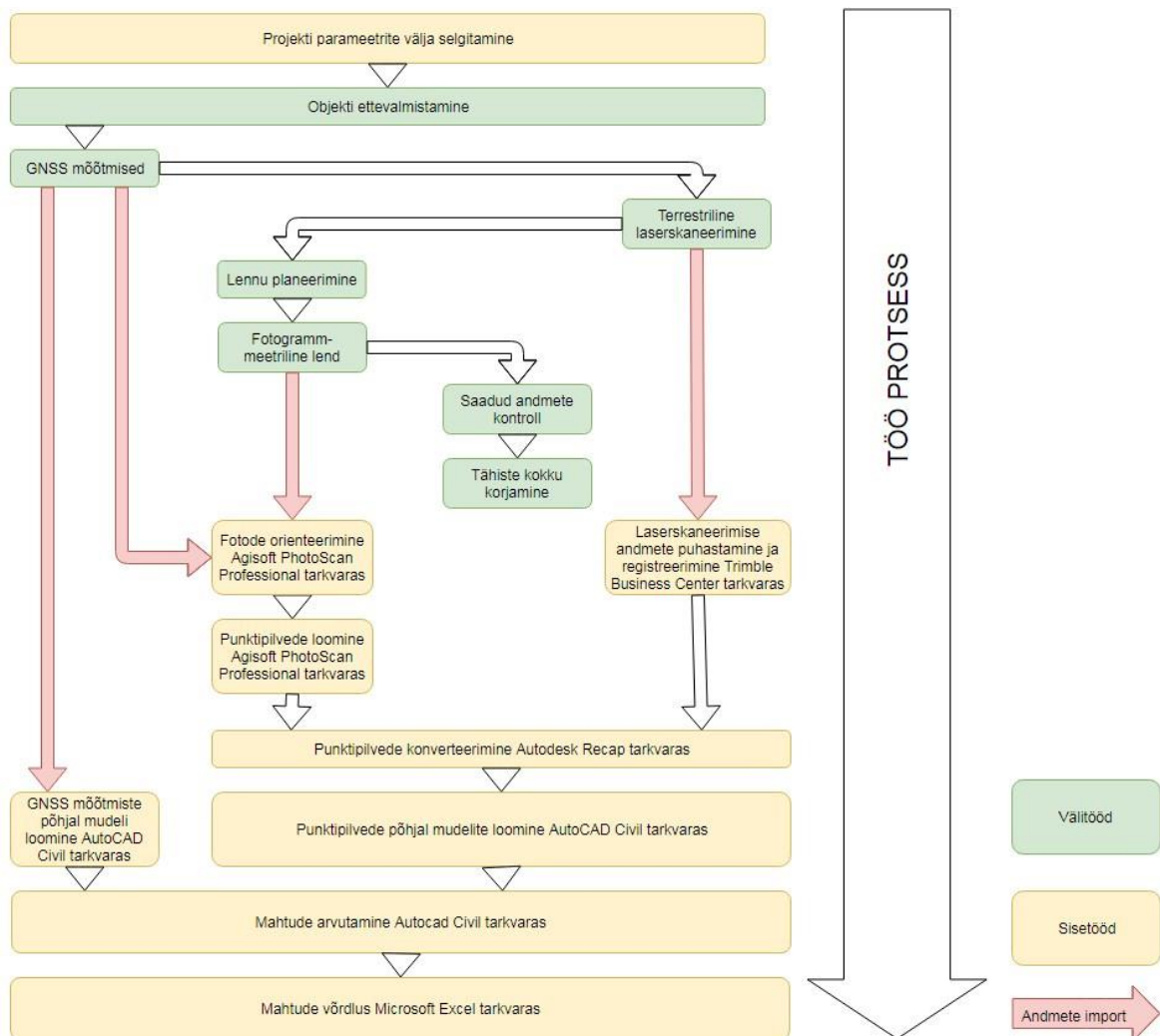
Tulemuste analüüs toimus tarkvaras **Microsoft Excel**.

## 2.2 Uurimistöös kasutatud materjal ja metoodika

Püstitatud eesmärgi täitmiseks viidi uurimistöö läbi metoodika järgi, mille protsess on kujutatud joonisel 2.6. Kõigepealt valiti välja sobivad objektid ja instrumendid.

Objektile jõudes toimus kõigepealt objekti ettevalmistus, mille käigus paigaldati vajalikud fotogramm-meetrilised tähised. Seejärel toimusid RTK GNSS mõõtmised, terrestriline laserskaneerimine, lennu planeerimine ja fotogramm-meetriline lend. Pärast andmete

kogumist kontrolliti need kiirelt objektile üle ning seejärel korjati varem paigaldatud tähised kokku.



**Joonis 2.6.** Uurimistöö protsess.

Seejärel toimus andmete töötlus, mille käigus koostati erinevate instrumentide abil kogutud andmetest objektide mudelid ning arvutati välja nende mahud. Pärast mahtude arvutamist võrreldi erinevate meetoditega koostatud mudelite mahtude suhtelist ja absoluutset erinevust üksteisest.

Antud metoodika järgi viidi erinevad protsessid läbi mõlemal valitud objektile ning mõlema mehitamata õhusõiduki puhul.

### 2.2.1 Mõõdistustööde läbiviimine Laiküla turbamaardlas

Esimeseks objektiks valiti Laiküla turbamaardlas asuv turbaaun (joonis 2.7), kuna tegemist on pehme materjaliga on selle harja mõõtmine manuaalselt raskendatud ja ohtlik. Turbaaun oli korrapärase kujuga, mis lihtsustas aluskontuuri mõõtmist. Turbaaunade mahtude mõõtmine on geodeetide igapäevane töö ning kuna neid tuleb mõõta hooaja jooksul mitu korda oleks kasulik uurida võimalusi töö efektiivsemaks muutmiseks.

Mõõdistamine toimus Eesti Maaülikooli, Raxoest OÜ ja geodeedi Kaido Põrk koostöona. Mõõdistustel kasutati Eesti Maaülikooli Trimble R4-3 GNSS-vastuvõtjat ja Trimble TSC3 väliarvutit. Lisaks GNSS mõõdistusele teostati aeropildistamine ja laserskaneerimine kasutades Raxoest OÜ seadmeid. Aeropildistamiseks kasutati mehitamata õhusõidukeid DJI Phantom 4 Pro ja Aibotix Aibot X6. Laserskaneerimiseks kasutati skaneerivat tahhümeetrit Trimble SX10.



**Joonis 2.7.** Uurimistööobjektiks valitud turbaaun on pildil paremal. (Foto: Mart Rae)

Mõõdistustöid soosis selge ja tuulevaikne ilm. Tänu külmakraadidele oli turbaauna üks nõlv jäätunud ja õnnestus ronida ka turbaauna harjale, et seal kontrollmõõtmine teostada ja punkt märgistada. Soojema ilma puhul oleks tõenäoliselt üles saamiseks tulnud kasutada



rasketehnika abi, mis oleks töid oluliselt aeglustanud. Tänu tuulevaiksele ilmale läksid ka lennud viperusteta. Mõõtmised toimusid 24. oktoobril 2017.

Kõigepealt toimus **objekti ettevalmistamine**. Selle käigus paigaldati auna nõlvadele, harjale ja ümbrusesse tähised. Tähisteks olid 12 aerosoolvärviga tehtud punkti (joonis 2.8) ja 9 spetsiaalset fotogramm-meetrilist tähist (joonis 2.9). Märkide paigaldamise peale kulus umbes 20 minutit.

Välitööde käigus teostati **RTK GNSS mõõtmised** Trimble R4-3 vastuvõtjaga. Mõõdeti auna kontuur ning selle hari, kokku 20 punkti. Kuna tegemist oli turbamaardlaga, oli taevalaotuse avatus hea. Lisaks sellele mõõdeti tähiste koordinaadid, igal tähisel mõõdeti 20 epohhi. Mõõtmiste käigus saadi andmeid 13 kuni 19 satelliidilt ning PDOP oli 1,3 kuni 2,0. Punktide horisontaalne täpsus jäi GNSS seadme aruande järgi horisontaalselt kolme ja vertikaalselt 5 sentimeetri piiresse. Selle etapi peale kulus umbes 40 minutit.



**Joonis 2.8.** Laiküla turbamaardlas kasutatud aerosoolvärviga tähis.



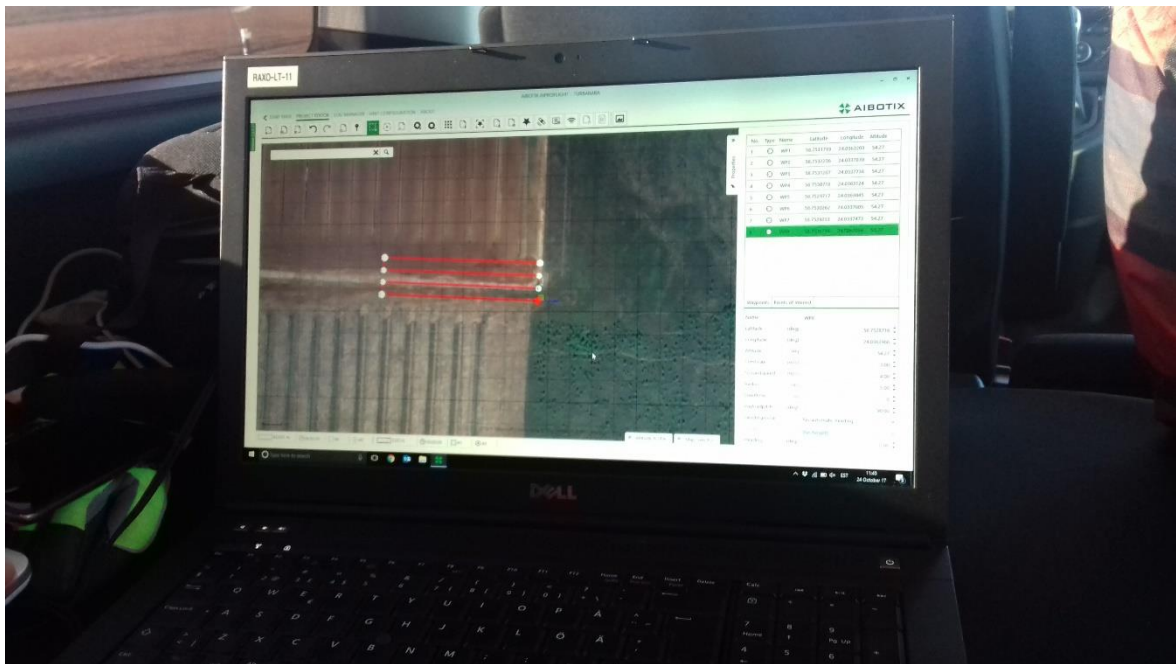
**Joonis 2.9.** Laiküla turbamaardlas kasutatud spetsiaalne fotogramm-meetriline tähis.

Pärast GNSS mõõtmisi viidi läbi ka auna **terrestriline laserskaneerimine** Trimble SX10 seadme abil. Skanner orienteeriti igas seisupunktis GNSS seadmega mõõdetud kontrollpunktide abil. Kokku skaneeriti auna neljast seisupunktist ja punktipilv pandi kokku automaatselt välitööde käigus. Trimble SX10 spetsifikatsioonid on välja toodud tabelis 2.1. Skaneerimisele kulus umbes tund aega.

Seejärel sooritati lennud DJI Phantom 4 pro ja Aibotix Aibot X6 mehitamata õhusõidukitega. Enne lendude alustamist tuli veenduda, et kõik tähised on paigaldatud. Järgnevalt kirjeldatakse tehtud mõõtmisi lähemalt.

**DJI Phantom 4** lennu planeerimine toimus tahvelarvutis DroneDeploy tarkvaras ning võttis aega alla viie minuti. Määrata tuli lennu kõrgus, objekti asukoht ja suurus, pildistamise sagedus jms. Seejärel arvutas tarkvara välja optimaalse trajektoori ning pärast õhusõiduki lennuvalmis seadmist algas lend. Lend kestis umbes 5 minutit, kuid antud objektile mõõdeti ala väga suure ülekattetega. Pärast missiooni lõpetamist tuli õhusõiduk alguse kohta tagasi ning maandus. Antud õhusõidukiga on võimalik õhku tõusta ja maanduda nii autonoomselt, kui ka puldiga juhtides. Sel puhul juhiti õhku tõustes ja maandudes õhusõidukit puldi abil. Kokku tehti 415 fotot, millest kasutati 76. Lennu kõrgus oli 33 meetrit ning piksli suurus maapinnal 8 mm.

**Aibot X6** lennu planeerimine toimus sülearvutis tarkvaras Aibotix AiProFlight ning võttis aega umbes 15 minutit (joonis 2.10). Ka õhusõiduki lennukorda seadmine võttis pisut rohkem aega, kui väiksema DJI puhul. Lend kestis samuti umbes 5 minutit. Ka Aibotix X6 viidi õhku ja maandati puldi abil. Lennu planeerimise ajal koostatud missiooni täitis see samuti autonoomselt. Kokku tehti 95 fotot, millest kasutati 48. Lennu kõrgus oli 47 meetrit ning piksli suurus maapinnal 6 mm.



**Joonis 2.10.** Tarkvaras Aibotix AiProFlight lennu planeerimine.

Pärast lendusid vaadati saadud tulemused kiirelt üle ning pakiti kasutatud seadmed transpordi asendisse. Seejärel eemaldati objektilt taaskasutatavad spetsiaalsed fotogrammeetrilised märgid, milleks kulus umbes 10 minutit ja sellega olid välitööd antud objekti lõppenud.

## 2.2.2 Mõõdistustööde läbiviimine Karude karjääris

Teine objekt oli Karude karjääris asuv purustatud kruusa puistang (joonis 2.11). See on lihtsamini ligipääsetav ja manuaalselt mõõdetav, kuid kruusakarjäärid on samuti üks

potentsiaalne koht, kus saaks mehitamata õhusõiduki abil tööd efektiivsemaks muuta. Antud objekt oli ebakorrapärase kujuga, mis tegi manuaalse mõõtmise keerulisemaks. Lisaks sellele on võimalik võrrelda objekti omaduste, nagu värv ja pinna konarused mõju mõõtmiste täpsusele.

Mõõdistamine toimus Eesti Maaülikooli ja Raxoest OÜ koostööna. Mõõdistustel kasutati Eesti Maaülikooli Trimble R4-3 GNSS-vastuvõtjat ja Trimble TSC3 väliarvutit. Lisaks GNSS mõõdistusele teostati aeropildistamine ja laserskaneerimine kasutades Raxoest OÜ seadmeid. Aeropildistamiseks kasutati mehitamata õhusõidukit DJI Phantom 4 Pro v2.0. Laserskaneerimiseks kasutati skaneerivat tahhümeetrit Trimble SX10. Mõõtmised toimusid 10. aprillil 2018.

Mõõtmised toimusid analoogselt Laiküla turbamaardlas toimunud mõõtmistega. Peamisteks erinevusteks oli see, et kasutati ainult ühte mehitamata õhusõidukit ja ainult spetsiaalseid fotogramm-meetrilisi tähiseid. Skanneriga mõõtmistel loodi seisupunkte kaheksa ning nendest kokku üks punktipilv.

**Objekti ettevalmistuse** käigus paigaldati puistangu nõlvadele, peale ja ümbrusesse tähised, milleks olid 18 spetsiaalset fotogramm-meetrilist tähist (joonis 2.9). Märkide paigaldamise ja mõõtmise peale kulus umbes 15 minutit.

**RTK GNSS mõõtmised** teostati Trimble R4-3 vastuvõtjaga. Mõõdeti puistangu ülemine ja alumine kontuur ning suuremad konarused, kokku 100 punkti. Kuna puistang oli üsna keerulise kuju ja paljude konarustega mõõdeti see üsna tihedalt. Pärast seda mõõdeti fotogramm-meetrilised tähised, igal tähisel mõõdeti 20 epohhi. Karjääris oli taeva laotuse avatus hea. Mõõtmiste käigus saadi andmeid 14 kuni 17 satelliidilt ning PDOP oli 1,2 kuni 1,8. Punktide horisontaalne täpsus jäi GNSS seadme aruande järgi horisontaalselt 8 ja vertikaalselt 12 millimeetri piiresse. Selle etapi peale kulus umbes 55 minutit.





**Joonis 2.11.** Karude karjääris välja valitud objekt. Pildil toimub RTK GNSS mõõtmine ja tähiste paigaldamine.

Pärast GNSS mõõtmisi viidi läbi puistangu **terrestriline skaneerimine** Trimble SX10 seadme abil. Kokku skaneeriti puistang kaheksast seisupunktist ja punktipilv pandi kokku automaatselt välitööde käigus. Skaneerimisele kulus umbes kaks tundi.

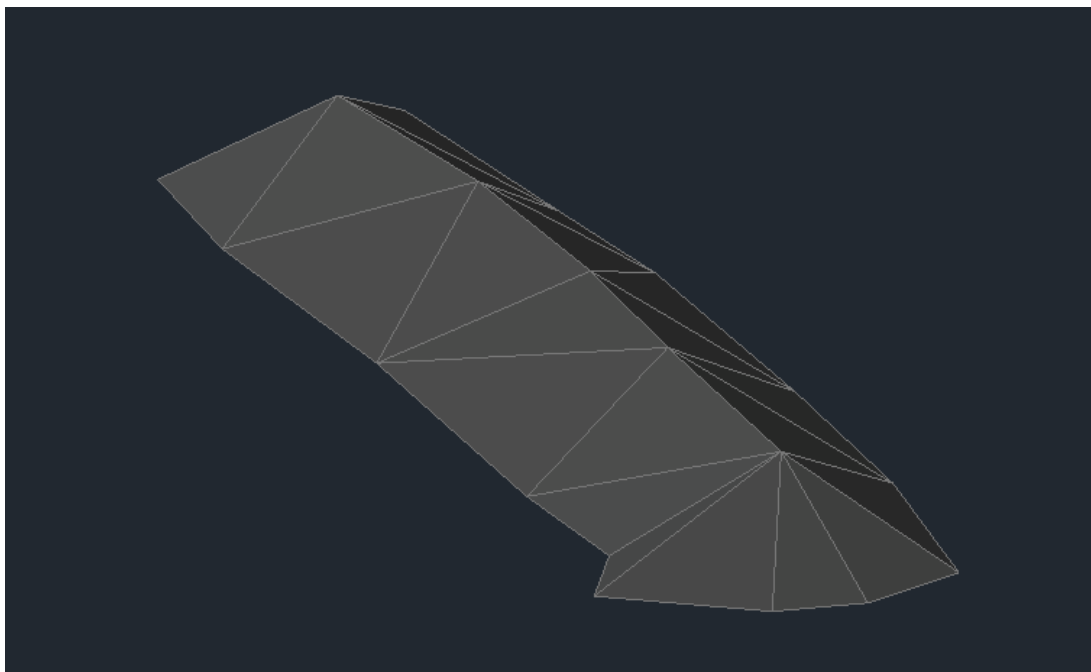
**DJI Phantom 4 v2.0** lennu planeerimine toimus tahvelarvutis DroneDeploy tarkvaras ning võttis taas aega alla viie minuti. Lend kestis umbes viis minutit. Kokku tehti 139 fotot, millest kasutati 55. Lennu kõrgus oli 28 m ning piksli suurus maapinnal 6 mm.

### **2.2.3 Andmete töötlus**

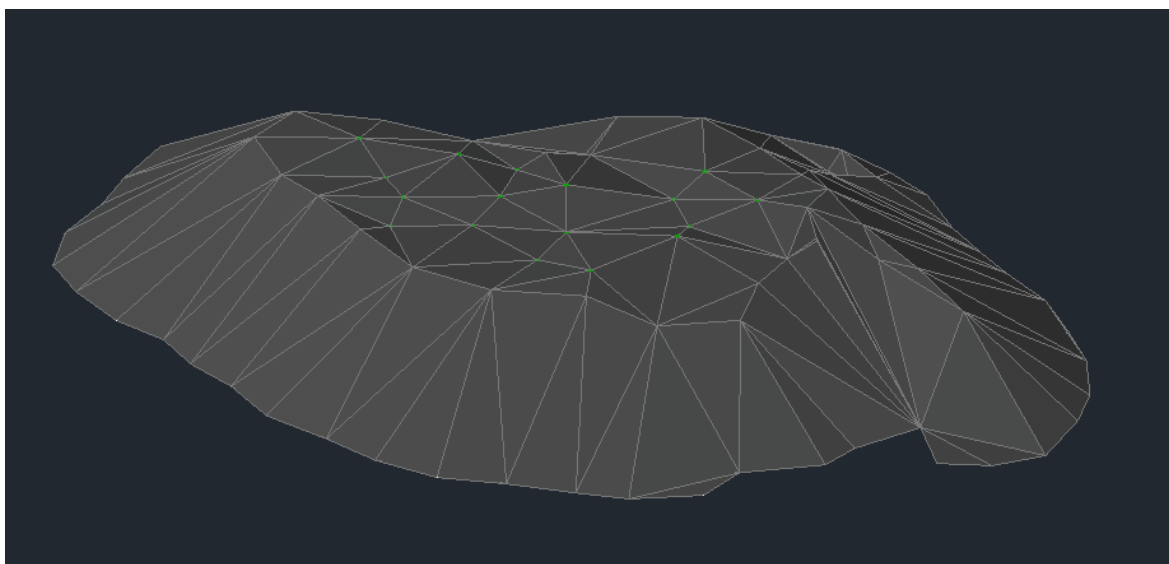
Uurimistöös kasutati kahel objektil GNSS vastuvõtjaga kogutud punktide koordinaate, laserskaneerimise tulemusena saadud punktipilvi ning mehitamata õhusõidukitelt kogutud JPEG pilte koos piltide asukohtade kohta käivate andmetega.

**GNSS meetodil** mõõdetud objektide pinda kujutavate punktide koordinaadid sisestati joonestusprogrammi Civil 3D 2019. Tarkvaras joonistati välja kontuurid ja vajalikud murdejooned ning seejärel loodi eraldi pindadena puistangu põhi ja selle pealispind

(joonised 2.12 ja 2.13). Pärast seda võrreldi nende pindade kõrgusi ja arvutati välja ruumala, mis kahe pinna vahele jäi.

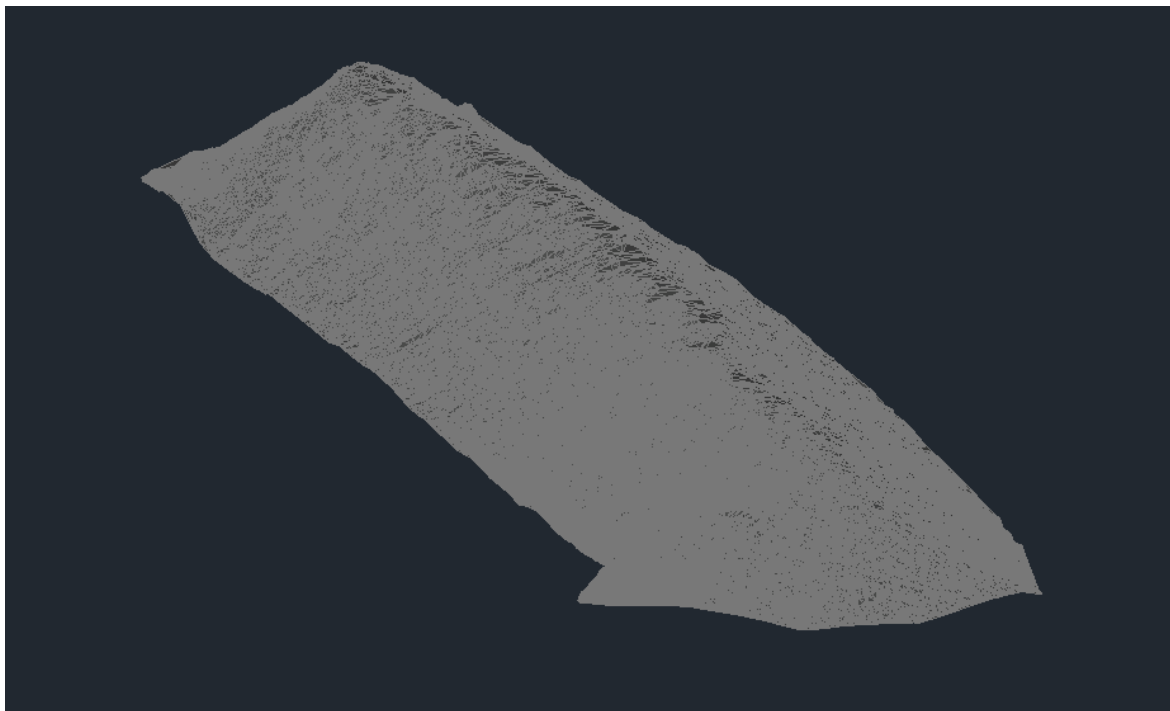


**Joonis 2.12.** Tarkvaras Civil 3D 2019 GNSS mõõtmise tulemustest moodustatud Laiküla objekti mudel.



**Joonis 2.13.** Tarkvaras Civil 3D 2019 GNSS mõõtmise tulemustest moodustatud Karude objekti mudel.

**Laserskaneerimise** käigus saadud punktipilved puhastati tarkvaras Trimble Business Center ning seejärel konverteeriti tarkvaras Autodesk Recap las failiformaadist rcp formaati, et oleks neid mugavam Autodesk Civil 3D programmis töödelda. Civil 3D tarkvaras tõsteti puistangu GNSS seadmega mõõdetud puistangu alumine kontuur kõrguslikult ühe välja valitud tähise järgi paika. Seejärel moodustati aluse kontuurist aluse pind. Pärast seda loodi skaneeritud punktipilvest puistangu pind (joonis 2.14). Selle jaoks kasutati ainult aluskontuuri sisse jäävaid punkte, pilve hõrendati nii, et punktivaheks jäi 5 cm ning võrgu loomiseks kasutati *kriging* meetodit. Seejärel võrreldi jälle nende pindade kõrgusi ning arvutati välja puistangu ruumala.



**Joonis 2.14.** Tarkvaras Civil 3D 2019 laserskaneerimise tulemustest moodustatud Laiküla objekti mudel.

Fotogramm-meetrilisel meetodil mahtude leidmiseks imporditi aeropildistamise käigus saadud fotod programmi Agisoft PhotoScan Professional ja pildid orienteeriti, seejärel toodi sisse fail tähiste koordinaatidega ning kinnitati manuaalselt vastavad punktid piltidel näha olevate tähiste külge (joonis 2.15). See oli üsna aeganõudev protsess ja kuna võrdlusmomendi huvides kasutati kahte komplekti tähiseid läks selle peale umbes kaks tundi. Pärast tähiste kinnitamist orienteeriti pildid uuesti *Medium* täpsusklassi kasutades.

Seejärel loodi punktipilv, kvaliteediks valiti samuti *Medium*. Aibot X6 andmete puhul kasutati ka õhusõidukil lennu ajal kogutud IMU seadme abil kogutud kaamera orientatsiooni andmeid. Keskpärase arvutiga võtsid need protsessid ka *Medium* varianti kasutades mitu tundi aega, kuid selle protsessi juures inimest arvuti juures olema ei pea.



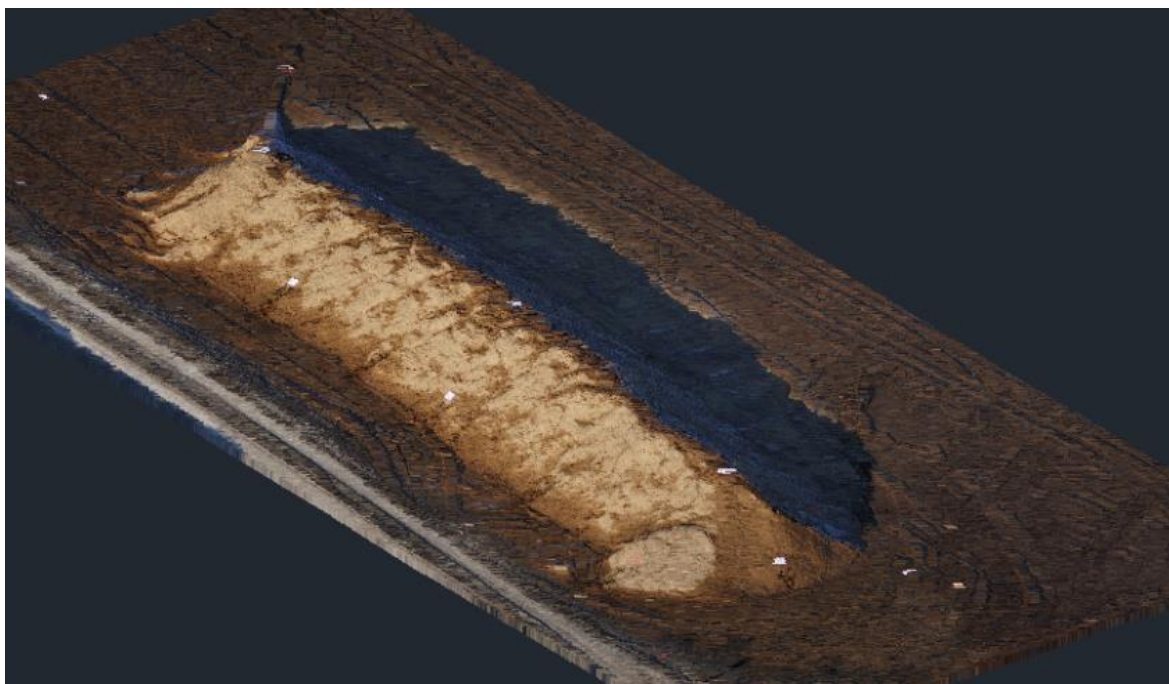
**Joonis 2.15.** Koordinaatide kinnitamine tähistele tarkvaras Agisoft PhotoScan Professional.

Fotogramm-meetrilisel meetodil loodi Laiküla objekti kohta 8 erinevat mudelit ja Karude objekti kohta 4 erinevat mudelit (tabel 2.2) .

**Tabel 2.2.** Fotogramm-meetrilisel meetodil loodud erinevad mudelid.

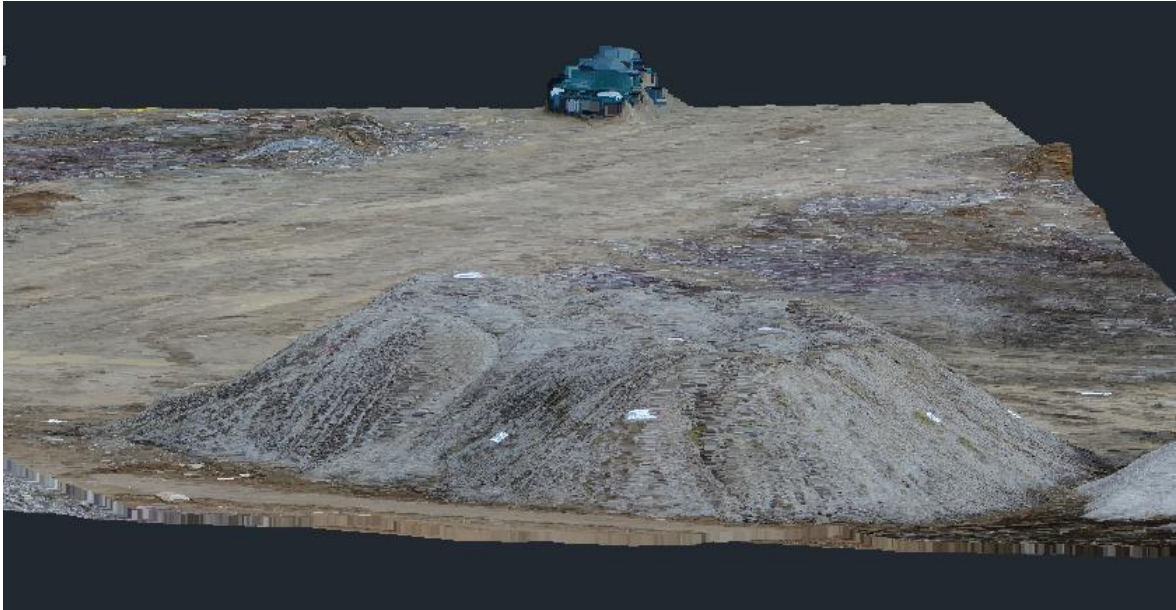
Objekt	Mehitamata õhusõiduk	Orienteerimisel kasutatud tähised
Laiküla turbamaardla	Aibotix Aibot X6	Ilma tähisteta
		Aerosoolvärviga tähised
		Fotogramm-meetrilised tähised
		Kõik tähised
	DJI Phantom 4 Pro	Ilma tähisteta
		Aerosoolvärviga tähised
		Fotogramm-meetrilised tähised
		Kõik tähised
Karude karjäär	DJI Phantom 4 Pro	Ilma tähisteta
		7 fotogramm-meetrilist tähist
		9 fotogramm-meetrilist tähist
		16 fotogramm-meetrilist tähist

Pärast punktipilvede loomist töödeldi neid samuti nagu eelnevalt kirjeldatud laserskaneerimise punktipilve kohta (joonised 2.16, 2.17 ja 2.18). Tähisteid, mida kasutati aluskontuuri paika tõstmiseks ei kasutatud fotode orienteerimise protsessis.

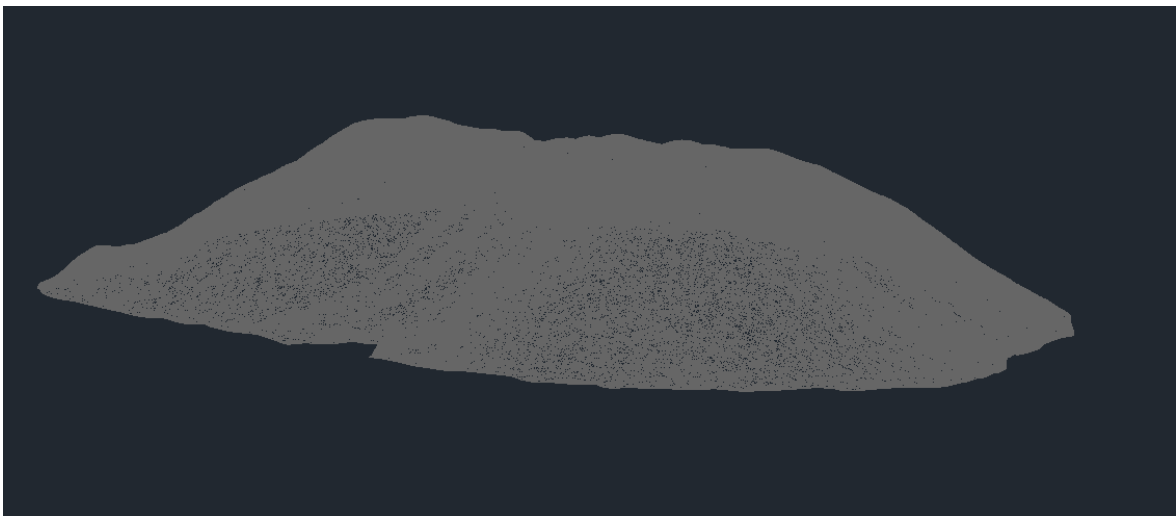


**Joonis 2.16.** Aibot X6 pardalt kogutud fotodest moodustatud Laiküla objekti punktipilv.





**Joonis 2.17.** DJI Phantom 4 Pro pardalt kogutud fotodest moodustatud Karude objekti punktipilv.



**Joonis 2.18.** DJI Phantom 4 Pro pardalt kogutud fotodest moodustatud Karude objekti mudel.

Pärast kõigi erinevatel meetoditel leitud mahtude leidmist kanti need Microsoft Excel tarkvaras tabelisse ja võrreldi neid vastavalt objektile omavahel. Kuna laserskaneerimist loetakse mudelite loomisel teistest kasutatud meetoditest täpsemaks, loeti uurimistöö huvides õigeks Laiküla objektis laserskaneerimise mudeli maht ja Karude objektis kõigist kaheksast seisupunktist kokku pandud mudeli maht. Leiti nii absoluutne ruumala erinevus,

kui ka suhteline ning jälgiti, kas suhteline erinevus mahub eespool välja toodud lubatud piiridesse.

Sarnaselt eespool kirjeldatud Richard Kramer Rhodes'i poolt läbiviidud uurimistööle (Rhodes 2017) leiti lisaks suhtelisele erinevusele ka mõlemal objektil erinevate fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite keskmised ruutvead. Keskmise ruutvea arvutamiseks kasutati Gaussi keskmise ruutvea valemit (Randjärv, 1997)

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}, \quad (2.1)$$

kus  $\Delta^2$  on laserskaneerimise andmetest saadud mudeli mahu ja fotogramm-meetrilisel teel saadud mudeli mahtude vahede ruutude summa ja  $n$  on erinevate mudelite arv.

Keskmise ruutvea  $m$  täpsuse hindamiseks arvutati tulemuse keskmine ruutviga valemiga (Randjärv, 1997)

$$m_m = \pm \frac{m}{\sqrt{2n-1}}, \quad (2.2)$$

kus  $m$  on keskmine ruutviga ja  $n$  on erinevate mudelite arv.

Laikülas leiti keskmised ruutvead mõlema mehitamata õhusõiduki andmetest tehtud mahtude absoluutsete erinevuste, kahe erineva mehitamata õhusõiduki andmetest koostatud mudelite erinevustest eraldi ning kahe erineva mehitamata õhusõiduki andmetest erinevate tähistega koostatud mudelite mahtude erinevuste kohta, jättes välja ilma tähisteta mudelite mahud.

Lisaks sellele analüüsiti erinevatel meetoditel mahtude määramise viiside erinevatele etappidele kulunud aegu ning võrreldi neid omavahel.

### 3. UURIMISTÖÖ TULEMUSED

#### 3.1 Erinevate objektide kohta loodud mudelite mahud

Nagu mainitud uuriti erinevatel meetoditel loodud mudelite mahtude arvutamist kahel erineval objektil. Esimene objekt oli Laiküla turbamaardlas asuv korrapärase kujuga turbaaun ja teine Karude karjääris asuv purustatud kruusa puistang. Erinevateks meetoditeks olid RTK GNSS andmetest, terrestrilise laserskaneerimise andmetest ja kahe erineva mehitamata õhusõiduki piltide põhjal mudelite loomine. Fotogramm-meetrilisel meetodil loodi mitu mudelit erineva arvu ja omadustega tähistega. Kõigi loodud mudelite mahtusid võrreldi laserskaneerimise andmete põhjal loodud mudeli mahuga, mis loeti antud töö teostamiseks õigeks.

##### 3.1.1 Laiküla turbamaardla objekti mudelite mahud

Laiküla turbarabas välja valitud auna **terrestrilise laserskaneerimise** käigus, skaneeriti objekti neljast seisupunktist. Kogutud andmetest moodustatud mudeli mahuks saadi 722,52 kuupmeetrit.

**RTK GNSS mõõtmiste** käigus kogutud 20 punkti koordinaatide põhjal loodud mudeli mahuks saadi 680,55 kuupmeetrit.

**Fotogramm-meetriliselt** loodud mudelite mahud Aibot X6 mehitamata õhusõidukiga kogutud andmetest olid järgnevad: ilma tähisteta 704,92 m<sup>3</sup>, aerosoolvärviga tähistega 715,02 m<sup>3</sup>, spetsiaalsete fotogramm-meetriliste tähistega 730,27 m<sup>3</sup> ja kõiki tähiseid kasutades 717,49 m<sup>3</sup> (tabel 3.1). DJI Phantom 4 Pro abil kogutud andmetest loodud mudelite mahud olid järgmised: ilma tähisteta 708,21 m<sup>3</sup>, aerosoolvärviga tähistega 699,50 m<sup>3</sup>, spetsiaalsete fotogramm-meetriliste tähistega 742,23 m<sup>3</sup> ja kõiki tähiseid kasutades 730,48 m<sup>3</sup> (tabel 3.1).



**Tabel 3.1.** Laiküla turbamaardla objektil fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahud

Mehitamata õhusõiduk	Orienteerimisel kasutatud tähised	Maht (m <sup>3</sup> )
Aibotix Aibot X6	Ilma tähisteta	704,92
	Aerosoolvärviga tähised	715,02
	Fotogramm-meetrilised tähised	730,27
	Kõik tähised	717,49
DJI Phantom 4 Pro	Ilma tähisteta	708,21
	Aerosoolvärviga tähised	699,50
	Fotogramm-meetrilised tähised	742,23
	Kõik tähised	730,48

### 3.1.2 Karude karjääri objekti mudelite mahud

Karude karjääris välja valitud puistangu terrestrilise **laserskaneerimise** käigus skaneeriti objekti kaheksast seisupunktist. Kogutud andmetest moodustatud mudeli mahuks saadi 674,04 kuupmeetrit.

**RTK GNSS mõõtmiste** käigus kogutud 100 punkti põhjal loodud mudeli mahuks saadi 651,94 kuupmeetrit.

**Fotogramm-meetriliselt** loodud mudelite mahud DJI Phantom 4 Pro abil kogutud andmetest loodud mudelite mahud olid järgmised: ilma tähisteta 698,97 m<sup>3</sup>, seitsme spetsiaalse fotogramm-meetrilise tähisega 652,30 m<sup>3</sup>, üheksa spetsiaalse fotogramm-meetrilise tähisega 653,60 m<sup>3</sup> ja kõiki tähiseid kasutades 658,41 m<sup>3</sup> (tabel 3.2).

**Tabel 3.2.** Karude karjääri objektil fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahud

Mehitamata õhusõiduk	Orienteerimisel kasutatud tähised	Maht (m <sup>3</sup> )
DJI Phantom 4 Pro	Ilma tähisteta	698,97
	7 fotogramm-meetrilist tähist	652,30
	9 fotogramm-meetrilist tähist	653,60
	16 fotogramm-meetrilist tähist	658,41

## 3.2 Mahtude täpsuse hindamine

Mahtude täpsuse hindamisel loeti õigeaks laserskaneerimise tulemustest moodustatud mudeli maht ning võrreldi sellega teistel meetoditel loodud mudelite mahtusid. Leiti nii absoluutsed, kui ka suhtelised erinevused ja erinevate mudelite keskmised ruutvead.

### 3.2.1 Laiküla turbamaardla objekti mudelite mahtude täpsuse hindamine

Laiküla turbaraba objekti kohta loodi kokku 10 mudelit ja arvutati nende mahud ning erinevate mudelite erinevused laserskaneerimise andmetest loodud mudelist. Samuti leiti fotogramm-meetrilisel meetodil saadud mudelite mahtude keskmised ruutvead.

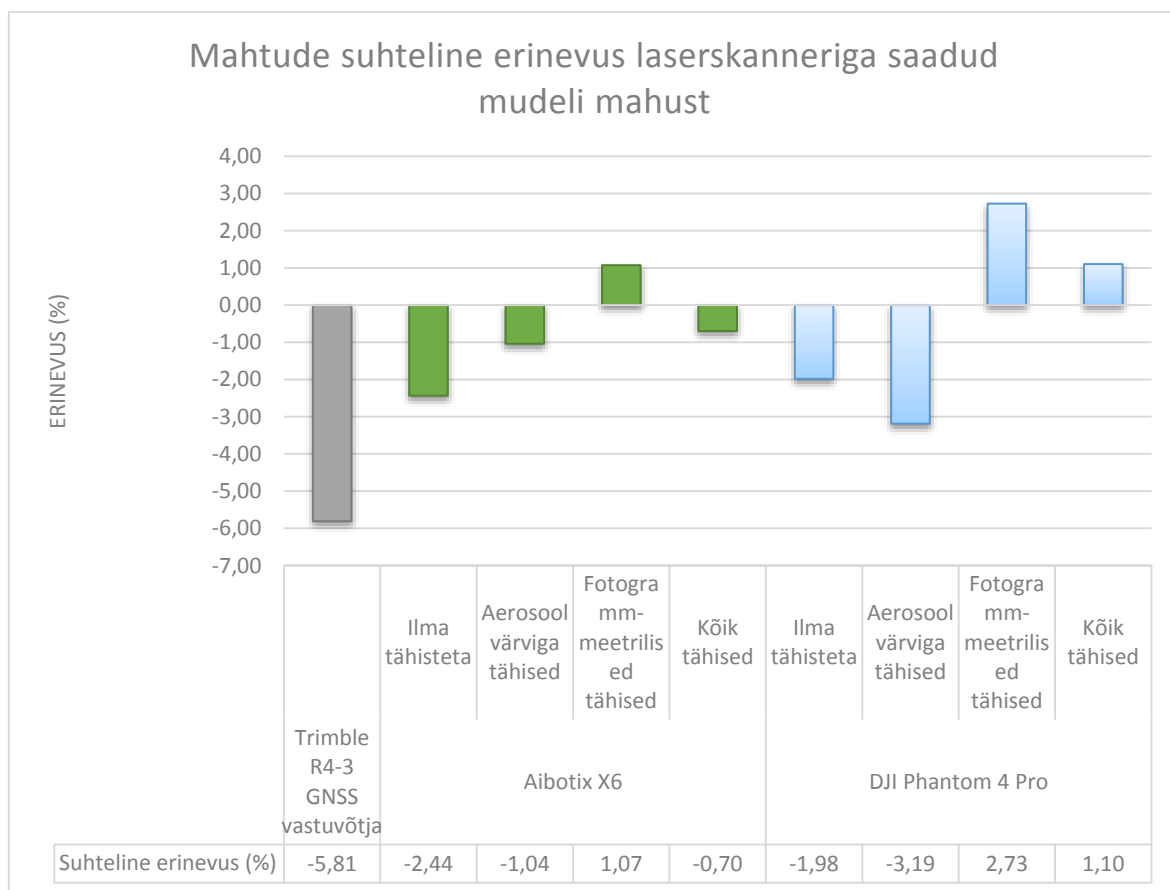
Laiküla turbarabas tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude erinevused laserskaneerimise andmetest loodud mudelist koos keskmiste ruutvigadega on toodud tabelis 3.3. Laiküla turbarabas tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused on toodud joonisel 3.1.

**Tabel 3.3.** Laiküla turbarabas tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude erinevused laserskaneerimise andmetest loodud mudelist koos keskmiste ruutvigadega

Instrument	Tähised	Maht (m <sup>3</sup> )	Erinevus (m <sup>3</sup> )	Suhteline erinevus (%)	Erinevuse ruut	Keskmine ruutviga (m <sup>3</sup> )		
Skaneeriv tahhümeeter Trimble SX10		722,52	0	0				
GNSS seade Trimble R4- 3		680,55	-41,97	-5,81				
Mehitamata õhusõiduk Aibot X6	Ilma tähisteta	704,92	-17,60	-2,44	309,76	6,87	10,62	
	Aerosool- värviga tähisted	715,02	-7,50	-1,04	56,25			
	Fotogramm- meetрилised tähisted	730,27	7,75	1,07	60,06			
	Kõik tähisted	717,49	-5,03	-0,70	25,30			
Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 Pro	Ilma tähisteta	708,21	-14,31	-1,98	204,78	18,09	17,23	14,31
	Aerosool- värviga tähisted	699,50	-23,02	-3,19	529,92			
	Fotogramm- meetрилised tähisted	742,23	19,71	2,73	388,48			
	Kõik tähisted	730,48	7,96	1,10	63,36			

Trimble R4-3 GNSS vastuvõtjaga kogutud andmete põhjal loodud mudeli mahu absoluutseks erinevuseks saadi  $-41,97 \text{ m}^3$ , mis tegi suhteliseks erinevuseks  $-5,81\%$ .

Mehitamata õhusõiduki Aibotix Aibot X6 andmete põhjal loodi neli erinevat mudelit. Ilma tähisteta loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-17,60 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-2,44\%$ . Aerosoolvärviga tehtud tähiseid kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-7,5 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-1,04\%$ . Spetsiaalseid fotogramm-meetrilisi tähiseid kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $7,75 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $1,07\%$ . Kõiki tähiseid kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-5,03 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-0,70\%$ . Kõigi Aibot X6 andmete põhjal loodud mudelite keskmiseks ruutveaks oli  $10,62 \text{ m}^3$  ja tähiseid kasutades loodud mudelite keskmine ruutviga oli  $6,87 \text{ m}^3$ . Keskmiste ruutvigade täpsusteks olid vastavalt  $3,69 \text{ m}^3$ ,  $4,02 \text{ m}^3$  ja  $3,07 \text{ m}^3$ .



**Joonis 3.1.** Laiküla turbarabas tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused.

Mehitamata õhusõiduki DJI Phantom 4 Pro andmete põhjal loodi neli erinevat mudelit. Ilma tähisteta loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-14,31 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-1,98\%$ . Aerosoolvärviga tehtud tähiseid kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-23,02 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-3,19\%$ . Spetsiaalseid fotogramm-meetrilisi tähiseid kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $19,71 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $2,73\%$ . Kõiki tähiseid kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $7,96 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $1,10\%$ . Kõigi Phantom 4 Pro andmete põhjal loodud mudelite keskmiseks ruutveaks oli  $17,23 \text{ m}^3$  ja tähiseid kasutades loodud mudelite keskmine ruutviga oli  $18,09 \text{ m}^3$ . Keskmiste ruutvigade täpsusteks olid vastavalt  $6,51 \text{ m}^3$  ja  $8,10 \text{ m}^3$ .

Kõigi mõlema mehitamata õhusõiduki andmete põhjal Laiküla turbamaardla objekti kohta fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahtude keskmiseks ruutveaks oli  $14,31 \text{ m}^3$ . Keskmise ruutvea täpsuseks oli  $3,69 \text{ m}^3$ .

### **3.2.2 Karude karjääri objekti mudelite mahtude täpsuse hindamine**

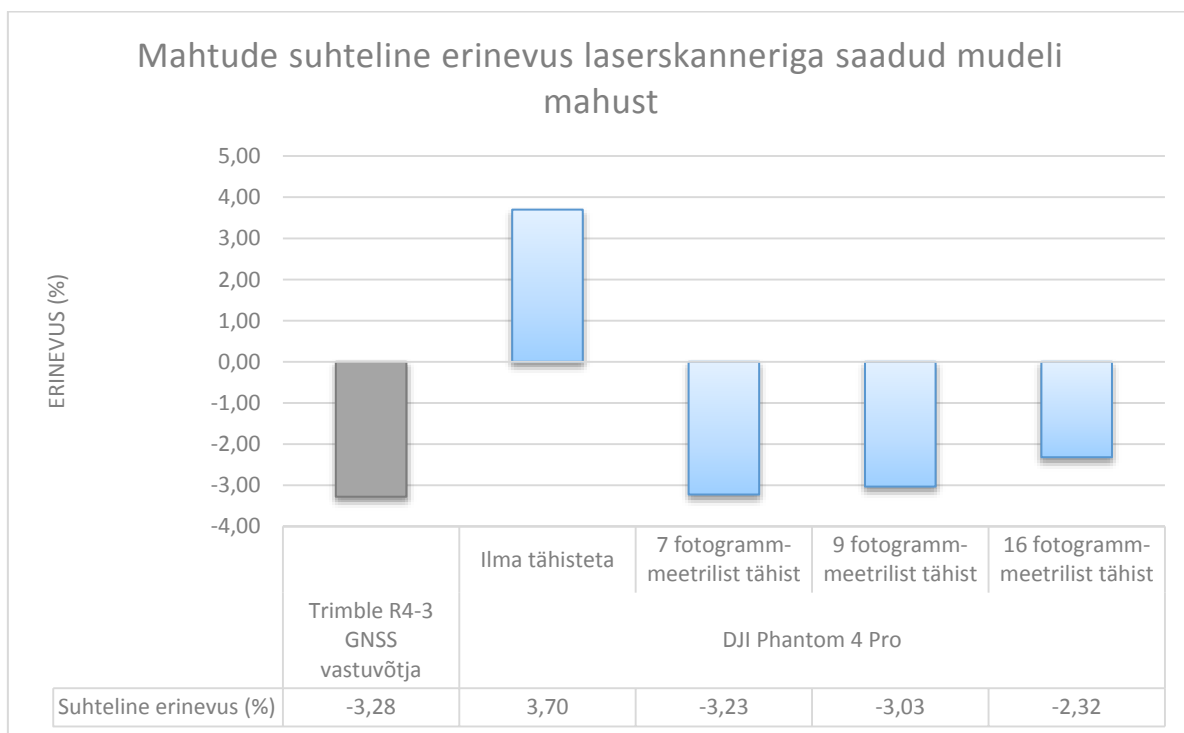
Karude karjääri objekti kohta loodi kokku kuus mudelit ja arvutati nende mahud ning erinevate mudelite erinevused laserskaneerimise andmetest loodud mudelist. Samuti leiti fotogramm-meetrilisel meetodil saadud mudelite mahtude keskmised ruutvead.

Karude karjääris tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude erinevused laserskaneerimise andmetest loodud mudelist koos keskmiste ruutvigadega on toodud tabelis 3.4. Laiküla turbarabas tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused on toodud joonisel 3.2.

**Tabel 3.4.** Karude karjääris tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude erinevused laserskaneerimise andmetest loodud mudelist koos keskmiste ruutvigadega

Instrument	Tähised	Maht (m <sup>3</sup> )	Erinevus (m <sup>3</sup> )	Suhteline erinevus (%)	Erinevuse ruut	Keskmine ruutviga (m <sup>3</sup> )	
Skaneeriv tahhümeeter Trimble SX10		674,04	0	0			
GNSS seade Trimble R4-3		651,94	-22,1	-3,28			
Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 Pro	Ilma tähisteta	698,97	24,93	3,70	621,50	19,45	20,95
	7 fotogramm-meetrist tähist	652,3	-21,74	-3,23	472,63		
	9 fotogramm-meetrist tähist	653,6	-20,44	-3,03	417,79		
	16 fotogramm-meetrist tähist	658,41	-15,63	-2,32	244,30		

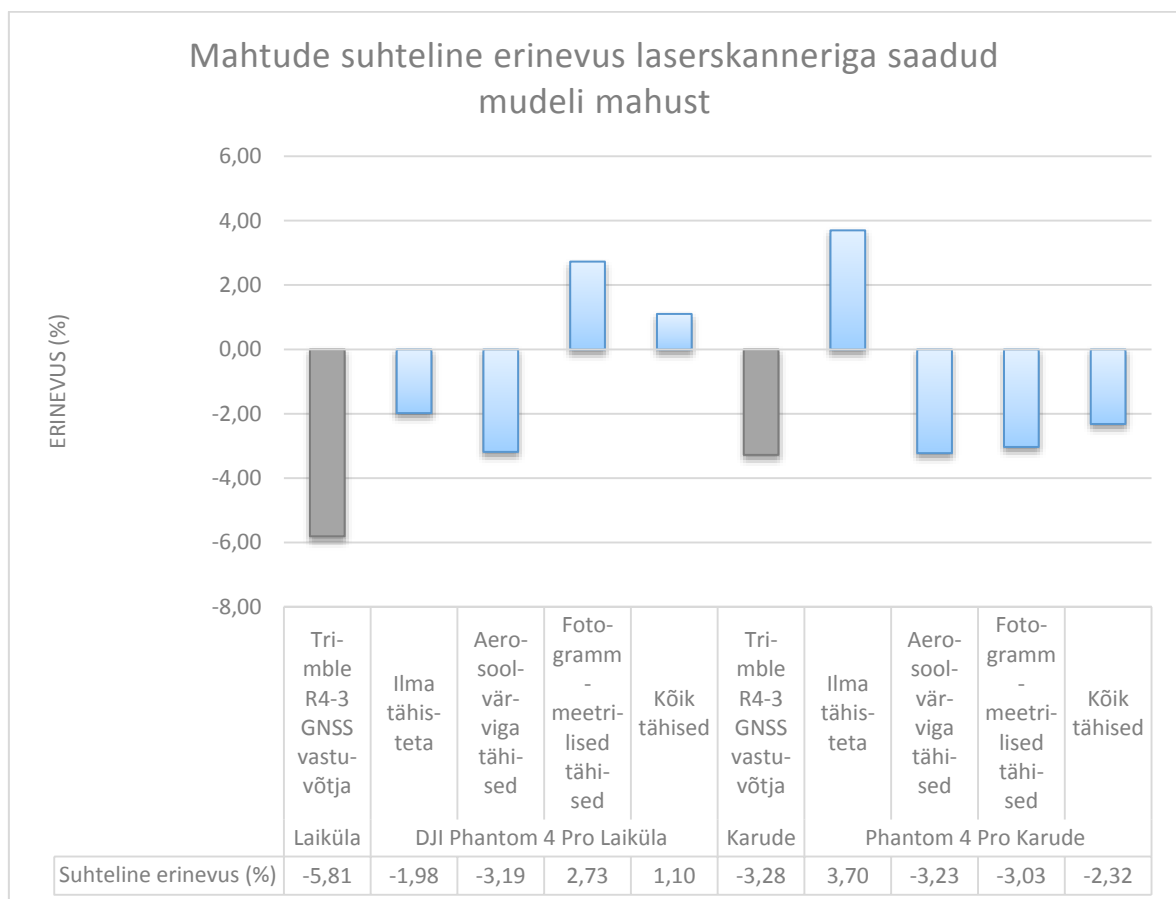
Trimble R4-3 GNSS vastuvõtjaga kogutud andmete põhjal loodud mudeli mahu absoluutseks erinevuseks saadi -22,10 m<sup>3</sup>, mis tegi suhteliseks erinevuseks -3,28%.



**Joonis 3.2.** Karude karjääris tehtud mõõtmiste põhjal loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused.

Mehitamata õhusõiduki DJI Phantom 4 Pro andmete põhjal loodi neli erinevat mudelit. Ilma tähisteta loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $24,93 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $3,70\%$ . Seitset spetsiaalset fotogramm-meetrist tähist kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-21,74 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-3,23\%$ . Üheksat spetsiaalset fotogramm-meetrist tähist kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-20,44 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-3,03\%$ . Kõiki 16 tähist kasutades loodud mudeli absoluutne erinevus oli  $-15,63 \text{ m}^3$  ja suhteline erinevus  $-2,32\%$ . Kõigi Phantom 4 Pro andmete põhjal loodud mudelite keskmiseks ruutveaks oli  $20,95 \text{ m}^3$  ja tähiseid kasutades loodud mudelite keskmine ruutviga oli  $19,45 \text{ m}^3$ . Keskmiste ruutvigade täpsusteks olid vastavalt  $7,92 \text{ m}^3$  ja  $8,70 \text{ m}^3$ .

Kahe objekti kohta loodud GNSS andmetest ja DJI Phantom 4 Pro andmetest erinevate mudelite mahtude suhteliste erinevuste võrdlus on toodud joonisel 3.3



**Joonis 3.3.** Laiküla ja Karude objekti GNSS ja DJI Phantom 4 Pro andmetest loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused laserskaneerimise andmetest saadud tulemustest.

Kahe objekti kohta käivaid suhtelisi erinevusi vaadates näeme, et Laiküla objektil saadi kõiki tähiseid kasutades suhteliseks erinevuseks laserskaneerimise andmetest moodustatud mudeli mahust 1,10% ja Karude objekti puhul 2,32%.

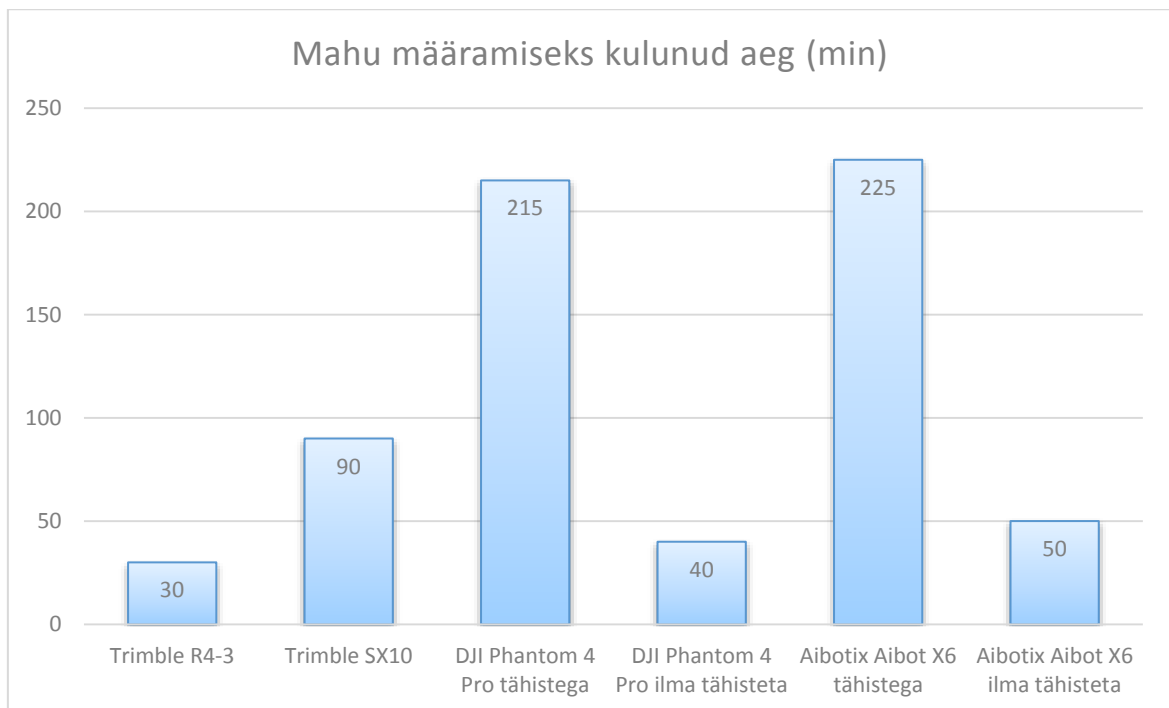
### 3.3 Mahtude määramisele kulunud aeg

Töö käigus hinnati ka erinevatel viisidel mahtude määramiseks kulunud aega. Tabelis 3.5 on välja toodud erinevate instrumentide andmete põhjal Laiküla turbamaardla objekti mahu määramise etapid ja nende kulunud aeg. Joonisel 3.4 on võrreldud erinevatel viisidel mahu määramiseks kulunud aega kokku.

**Tabel 3.5.** Erinevate instrumentide andmete põhjal Laiküla turbamaardla objekti mahu määramise etapid ja nende kulunud aeg

	GNSS seade Trimble R4-3	Skaneeriv tahhümeeter Trimble SX10	Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 Pro tähistega	Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 Pro ilma tähisteta	Mehitamata õhusõiduk Aibotix Aibot X6 tähistega	Mehitamata õhusõiduk Aibotix Aibot X6 ilma tähisteta
<b>Objekti ettevalmistus (min)</b>			20		20	
<b>RTK GNSS mõõtmine (min)</b>	15		25		25	
<b>Laserskaneeri- mine (min)</b>		60				
<b>Lennu planeerimine (min)</b>			5	5	15	15
<b>Fotogramm- meetiline lend (min)</b>			5	5	5	5
<b>Tähiste kokku korjamine (min)</b>			10		10	
<b>Andmetöötlus (min)</b>	15	30	150	30	150	30
<b>Kokku (min)</b>	30	90	215	40	225	50

Kõige kiiremini toimus Laiküla objekti puhul mahu määramine GNSS mõõtmiste abil, kuid see on eksitav, kuna tegemist oli ainult ühe korrapärase kujuga objektiga. Mida suurem ala ja ebakorrapärasemad objektid, seda rohkem tuleb esile laserskaneerimise ja eriti mehitamata õhusõidukite eelis. Lisaks sellele kulus antud objekti ettevalmistamisele ja tähiste mõõtmisele rohkem aega, kui tavaliselt, kuna kasutati erinevat tüüpi tähiseid. Tähiseid kasutades kulus antud juhul andmetöötlusele nii kaua aega, kuna tähiste asukohad määrati fotodel manuaalselt ja see on üsna aeganõudev protsess.



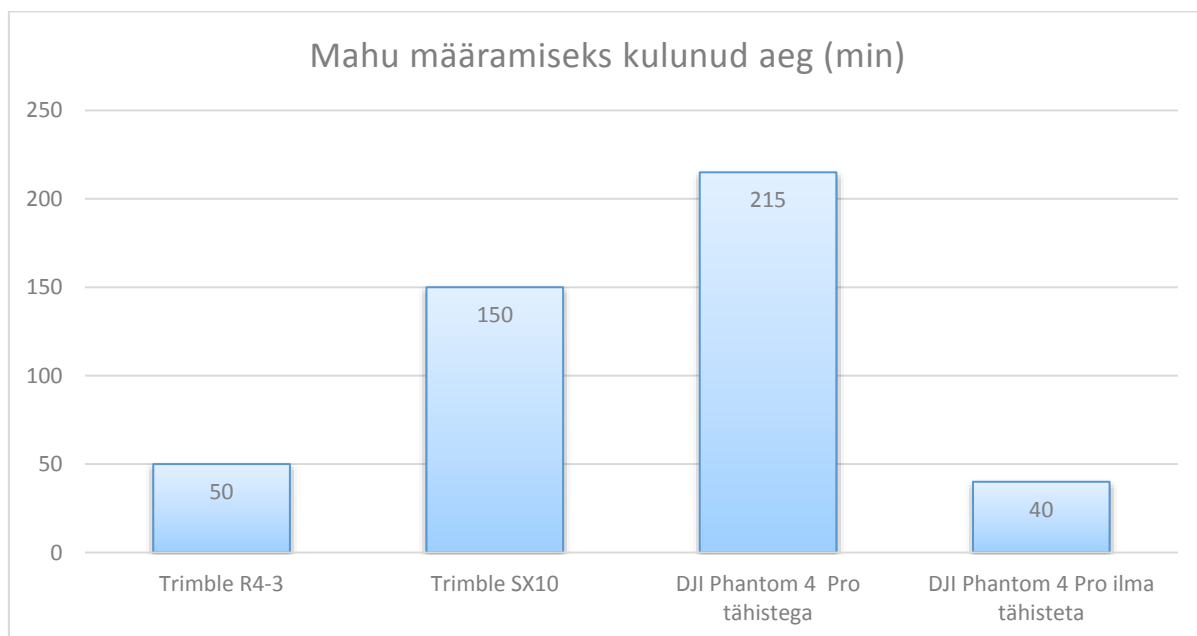
**Joonis 3.4.** Erinevatel viisidel Laiküla turbamaardla objekti mahu määramiseks kulunud aeg kokku.

Tabelis 3.6 on välja toodud erinevate instrumentide andmete põhjal Laiküla turbamaardla objekti mahu määramise etapid ja nendele kulunud aeg. Joonisel 3.5 on võrreldud erinevatel viisidel mahu määramiseks kulunud aega kokku.



**Tabel 3.6.** Erinevate instrumentide andmete põhjal Karude karjääri objekti mahu määramise etapid ja nendele kulunud aeg

	GNSS seade Trimble R4-3	Skaneeriv tahhümeeter Trimble SX10	Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 Pro tähistega	Mehitamata õhusõiduk DJI Phantom 4 Pro ilma tähisteta
<b>Objekti ettevalmistus (min)</b>			20	
<b>RTK GNSS mõõtmine (min)</b>	30		25	
<b>Laserskaneeri mine (min)</b>		120		
<b>Lennu planeerimine (min)</b>			5	5
<b>Fotogramm-meetiline lend (min)</b>			5	5
<b>Tähiste kokku korjamine (min)</b>			10	
<b>Andmetöötlus (min)</b>	20	30	150	30
<b>Kokku (min)</b>	50	150	215	40



**Joonis 3.5.** Erinevatel viisidel Karude karjääri objekti mahu määramiseks kulunud aeg kokku

Kõige kiiremini toimus Karude karjääri puhul mahu määramine ilma tähisteta fotogramm-meetrilisel meetodil. GNSS mõõtmistele kulunud aeg on eespool mainitud põhjustel jälle eksitav. Ka karude objektil kulus antud objekti ettevalmistamisele ja tähiste mõõtmisele rohkem aega, kui tavaliselt, kuna kasutati rohkem tähiseid, kui tavaliselt. Ka tähiste abil mudeli loomiseks kulus andmetöötluse käigus varem mainitud põhjustel rohkem aega. Laserskaneerimisel mõõdeti Karude objekti kaheksast seisupunktist aga tavaolukorras piisaks sellise objekti mõõtmisel kolmest või neljast seisupunktist, seega võiks ka skaneerimisele kulunud aeg olla tunduvalt lühem.

### 3.4 Arutelu

Kahest välja valitud objektist saadi ootuspäraselt täpsemad tulemused Laiküla turbamaardlas asunud korrapärase kujuga turbaauna kohta. Erandiks on siin GNSS mõõtmised, mille puhul erinevus laserskaneerimise mudeli mahust oli -5,81%. Selle põhjuseks võisid olla välimõõtmistel tehtud pehmest pinnasest tingitud vead ning liigsed lihtsustused ja liiga väheste punktide mõõtmine. Üllatavalt saadi ilma tähisteta fotogramm-meetriliste mudelite puhul samas suurusjärgus ja kohati isegi täpsemad tulemused, kui tähiseid kasutades. Siiski aitas kõigi tähiste kasutamine mõlemal objektil tulemuste täpsust parandada. Kui on vaja objektide koordinaate georeferentseerida, tuleks loomulikult tähiseid siiski kindlasti kasutada. Karude objektil jäi GNSS mõõtmiste põhjal loodud mudeli erinevus -3,28% samasse suurusjärku fotogramm-meetrilisel teel saadud mudelitega.

Laiküla objektil erineval viisil fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahtude erinevustest selgub, et parema kaamera ja spetsiaalselt mõõdistamise jaoks mõeldud Aibot X6 kogutud andmetest loodud mudelite erinevused olid täpsemad, kui odavama Phantom 4 Pro andmeid kasutades loodud mudelid. Erinevate mudelite keskmised ruutvead olid vastavalt 10,62 m<sup>3</sup> ja 17,23 m<sup>3</sup>. Arvatavasti tuleb kallima instrumendi paremus veel rohkem välja objekte globaalses koordinaatsüsteemis mõõtes, kuna Aibot X6 positsioneerimisseadmed on täpsemad. Kuna Phantom 4 Pro lendas malamal olid ka piksli suurused mõlema õhusõidukiga umbes samas suurusjärgus – Phantom 4 Pro puhul 8mm ja Aibot X6 puhul 8 mm. Suurema objekti puhul tähendab see muidugi Phantom 4 Pro jaoks pikemat lendu, aga kuna fotogramm-meetiline mõõdistamine on teistest mõõdistusviisidest suurusjärgu võrra kiirem, siis see ei tohiks suurt probleemi põhjustada.

Samuti ei täheldatud suurt mõju ruumalade täpsusele erinevate tähiste kasutamise puhul. Phantom 4 Pro puhul saadi aerosoolvärviga tähiseid kasutades ruumala suhteliseks erinevuseks -3,19% ja spetsiaalsete fotogramm-meetriliste tähiste puhul 2,73%. Aibot X6 puhul olid suhtelisteks erinevusteks vastavalt -1,04% ja 1,07%. Samas parandas Laiküla objektil kõigi tähiste kasutamine mõlema õhusõiduki abil kogutud andmetest loodud mudelite täpsust. Suhteliseks erinevuseks kõiki tähiseid kasutades olid Aibot X6 puhul ainult -0,7% ja Phantom 4 Pro puhul 1,1%.

Karude karjääris, kus kasutati ainult Phantom 4 Pro andmeid ja spetsiaalseid fotogramm-meetrilisi tähiseid, olid erinevate tähiste kasutamisel saadud tulemused üsna ootuspärased – mida rohkem tähiseid kasutati, seda täpsem oli mudel. Ilma tähisteta saadi suhteliseks erinevuseks 3,70%, 7 tähisega -3,23%, 9 tähisega -3,03% ja kõiki 16 tähist kasutades -2,32%.

Kahte objekti võrreldes selgus, et GNSS andmete põhjal arvutatud mahtude erinevusteks olid Laiküla objekti puhul -5,81% ja Karude objekti puhul -3,28%. Korrapärase kujuga Laiküla objekti puhul oli ilma tähisteta loodud DJI Phantom 4 Pro andmetest loodud mudeli suhteliseks erinevuseks -1,98% ja kõiki tähiseid kasutades 1,10%. Ebakorrapärase kujuga Karude objekti puhul oli ilma tähisteta loodud DJI Phantom 4 Pro andmetest loodud mudeli suhteliseks erinevuseks 3,70% ja kõiki tähiseid kasutades -2,32%.

Erinevatel meetoditel mahtude määramiseks kulunud aegu võrreldes tuli välja, et nii väikeste objektide mõõtmisel nagu käesolevas töös uurimiseks välja valita on GNSS meetodil otstarbekas, kuid mida suuremaks ja keerukamaks muutub objekt, seda kasulikumaks muutub fotogramm-meetrilise meetodi kasutamine. Suurema objekti puhul fotogramm-meetrilisel teel andmete kogumise aeg väga palju ei pikeneks, kuid GNSS mõõtmised võtaksid tunduvalt kauem aega.

Uurimistöö käigus selgus, et mehitamata õhusõidukilt kogutud fotode kasutamine mahtude määramisel aitaks tunduvalt kahandada välitöödele kuluvat aega. Kõigi antud töös fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahud jäid üsna suure varuga Markšeideritöö korras kehtestatud lubatud erinevuse 12% piiresse (Markšeideritöö kord 2012, § 4 lg 3). Samuti selgus, et kasutada võib ka lihtsaid, aerosoolvärviga tehtud tähiseid, mis tõstab samuti välitööde kiirust. Selgus, et mahtude arvutamiseks piisavat täpsust on võimalik saavutada ka odavamal mehitamata õhusõiduki ja kaamera komplekti kasutades. Eriti

kasulik oleks mehitamata õhusõidukeid kasutada just suuremate ja raskesti ligipääsetavate objektide mahtude määramisel.

## KOKKUVÕTE

Mehitamata õhusõidukite kasutamine geodeesias on tänu tehnoloogia arengule järjest enam levinud. Kiire arengu on teinud nii mehitamata õhusõidukid ise, kui ka nende pardal kasutatavad kaamerad, laserskannerid ja ka positsioneerimisseadmed. Mehitamata õhusõidukite suur populaarsus ja laiem kasutusele võtmine on kaasa toonud masstootmise ning seadmete odavuse. Samuti võimaldab fotogramm-meetria tarkvara kiire areng kasutada ka odavamaid digitaalkaameraid. Üldiselt ongi ka arvutustehnika ja tarkvara kiire areng mehitamata õhusõidukite kasutamisele geodeesias kõvasti kaasa aidanud.

Käesoleva uurimistöö teemaks valiti mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal tehtud puistangu mahuarvutuste täpsus, kuna geodeetide hulgas on huvi antud valdkonnas efektiivsemate mõõtmisviiside leidmiseks ning erinevate mõõtmisviiside täpsuse hindamiseks.

Magistritöö eesmärgiks oli hinnata mehitamata õhusõiduki andmetest fotogramm-meetrilisel teel puistangu mahtude määramise vastavust kehtivatele nõuetele ja võrreldi tulemusi tavapäraste RTK GNSS mõõtmise tulemustega. Lisaks sellele katsetati mudeli loomist ilma tähisteta ja erinevaid tähiseid kasutades ning võrreldi kahe erineva õhusõiduki kasutamist mahu määramiseks. Võrreldi ka kahe erinevate omadustega objekti mõju tulemustele ning hinnati erinevatel meetoditel töö etappidele kulunud aega.

Laiküla turbamaardlas asuva 722,52 kuupmeetri suuruse korrapärase turbaauna mahu arvutamisel saadi erinevate fotogramm-meetrilisel teel loodud mudeli mahtude keskmiseks ruutveaks 14,31 kuupmeetrit ning Karude karjääris asuva 674,04 kuupmeetri suuruse ebakorrapärase purustatud kruusa puistangu puhul 20,95 kuupmeetrit. Kõigi fotogramm-meetrilisel teel loodud mudelite mahtude suhtelised erinevused võrdluseks olnud laserskaneerimise tulemusel loodud mahust jäid alla 4%, mis jääb Markšeideritöö korras kehtestatud lubatud erinevuse 12% piiresse (Markšeideritöö kord 2012, § 4 lg 3). Laiküla turbamaardla puhul saadi RTK GNSS meetodil määratud mahu suhteliseks erinevuseks 5,81 protsendi ja erinevate fotogramm-meetrilisel teel leitud mahtude suhtelised erinevuse jäid 0,70 ja 3,19 protsendi vahele. Karude objekti puhul olid vastavateks tulemusteks 3,28 protsenti ja 2,32 kuni 3,70 protsenti. Erinevatele meetoditele ja tööetappidele kulunud aegu

hinnates selgus, et väiksema objekti puhul on töö efektiivsuse mõttes õigustatud RTK GNSS mõõtmiste kasutamine, aga mida suurem, keerulisem ja raskesti ligipääsetavam on objekt, seda enam tulevad välja mehitamata õhusõidukite kasutamise eelised.

Uurimistöö käigus selgus, et mehitamata õhusõidukite kasutamine mahtude määramisel annab piisava täpsuse ning selleks sobib ka odavam mehitamata õhusõiduk. Siiski peaks geodeetiliste- ja markseideritööde käigus mehitamata õhusõidukite kasutamisega tegelema vastava väljaõppe saanud spetsialistid. Kursis tuleks olla kindlasti ka mehitamata õhusõidukite käitamise kohta käiva seadusandlusega ja vajadusel taotleda vajalikud load. Antud töös saavutati mehitamata õhusõidukit kasutades ühel objektil umbes sama täpne ja teisel objektil isegi täpsem tulemus, kui RTK GNSS mõõtmisi kasutades. Leiti, et mahtude määramiseks piisav täpsus saavutati ka ilma tähisteid kasutamata, siiski aitas tähiste kasutamine täpsust parandada. Lisaks sellele ei olnud suurt mõju tulemustele erinevate tähiste kasutamisel. Siiski paranes mahu määramise täpsus tähiste arvu suurendades. Leiti, et erinevate omadustega objektide puhul saadi fotogramm-meetrilisel teel samas suurusjärgus täpsusega tulemused, kuid parem tulemus saadi siiski korrapärase kujuga turbaauna puhul. Kinnitust saadi ka hüpoteesile, et mehitamata õhusõidukite kasutamine aitab märgatavalt vähendada mahtude määramiseks vajalikele välitöödele kuluvat aega.

Tulevikus võiks uurida sarnaseid mõõtmisi suuremate objektide puhul. Tuleks katsetada ka erinevate fotogramm-meetriliste tarkvarade kasutamise mõju mahtude arvutamise tulemusele. Lisaks sellele võiks uurida fotogramm-meetria tarkvaras automaatse tähiste tuvastamise mõju mahu arvutamise tulemustele, kuna käesolevas uurimistöös oli manuaalne tähiste määramine piltidel kõige aeganõudvam osa andmetöötlusest.

## VIITED

Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4. (2018) *Agisoft koduleht*.

[http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_4\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf) (01.04.2018)

Aibot X6 (2018) *Aibotix koduleht*.

<https://aibotix.com/products/aibot-x6> (03.05.2018)

**Arango, C., Morales, C., A.** (2015) Comparison between multicopter uav and total station for estimating stockpile volumes – *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015, International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug–02 Sep 2015*. Toronto, Kanada. Lk 131-135.

[https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-](https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/131/2015/isprsarchives-XL-1-W4-131-2015.pdf)

[W4/131/2015/isprsarchives-XL-1-W4-131-2015.pdf](https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/131/2015/isprsarchives-XL-1-W4-131-2015.pdf) (05.04.2018)

**Bannister, A., Raymond, S., Baker, R.** (1992) Surveying. Sixth edition. Inglismaa: Longman Scientific & Technical. 482 lk

[https://tnigatu.files.wordpress.com/2012/04/surveyingedn6\\_bannister-raymond1992.pdf](https://tnigatu.files.wordpress.com/2012/04/surveyingedn6_bannister-raymond1992.pdf) (15.03.2018)

**Bendea, H. F., Chiabrando, F., Tonolo, F. G., Marenchino, D.** (2007) Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site. – *XXI International Symposium*. Ateena, Kreeka. 6lk.

[https://www.researchgate.net/publication/228372201\\_Mapping\\_of\\_archaeological\\_areas\\_u](https://www.researchgate.net/publication/228372201_Mapping_of_archaeological_areas_using_a_low-cost_UAV_The_Augusta_Bagiennorum_Test_Site)  
[sing\\_a\\_low-cost\\_UAV\\_The\\_Augusta\\_Bagiennorum\\_Test\\_Site](https://www.researchgate.net/publication/228372201_Mapping_of_archaeological_areas_using_a_low-cost_UAV_The_Augusta_Bagiennorum_Test_Site) (24.03.2018)

**Berg-Jürgens, J.** (2015) Erinevate meetoditega loodud ortofotomosaikide täpsus mehitamata lennuki MUST Q aerofotode näitel. Magistritöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 105 lk.

[https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/2360/Jaano\\_Berg-](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/2360/Jaano_Berg-Jürgens_2015MA_GEm_täistekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[Jürgens\\_2015MA\\_GEm\\_täistekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/2360/Jaano_Berg-Jürgens_2015MA_GEm_täistekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (03.04.2018)

**Clodius, W., B.** (2007) Multispectral and Hyperspectral Image Processing, Part 1: Initial Processing. – *Encyclopedia of Optical Engineering* Ameerika Ühendriigid: Taylor & Francis. Lk 1390-1405.

[https://books.google.ee/books?id=4hBTUY\\_2BMIC&pg=PA1439&lpg=PA1439&dq=Mul](https://books.google.ee/books?id=4hBTUY_2BMIC&pg=PA1439&lpg=PA1439&dq=Multispectral+and+Hyperspectral+Image+Processing+clodius&source=bl&ots=kH9onHcc0f&sig=6J3NCUa8rYUdFw0Bh7Bto2QUX1I&hl=et&sa=X&ved=0ahUKEwjDk7Se4_jaAhW)  
[tispectral+and+Hyperspectral+Image+Processing+clodius&source=bl&ots=kH9onHcc0f&](https://books.google.ee/books?id=4hBTUY_2BMIC&pg=PA1439&lpg=PA1439&dq=Multispectral+and+Hyperspectral+Image+Processing+clodius&source=bl&ots=kH9onHcc0f&sig=6J3NCUa8rYUdFw0Bh7Bto2QUX1I&hl=et&sa=X&ved=0ahUKEwjDk7Se4_jaAhW)  
[sig=6J3NCUa8rYUdFw0Bh7Bto2QUX1I&hl=et&sa=X&ved=0ahUKEwjDk7Se4\\_jaAhW](https://books.google.ee/books?id=4hBTUY_2BMIC&pg=PA1439&lpg=PA1439&dq=Multispectral+and+Hyperspectral+Image+Processing+clodius&source=bl&ots=kH9onHcc0f&sig=6J3NCUa8rYUdFw0Bh7Bto2QUX1I&hl=et&sa=X&ved=0ahUKEwjDk7Se4_jaAhW)



- JCJoKHaTgAMQQ6AEIJjAA#v=onepage&q=Multispectral%20and%20Hyperspectral%20Image%20Processing%20clodius&f=false (29.03.2018)
- Cramer, M.** (2001) Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Doktoritöö. Stuttgarti Ülikool. Stuttgart. 122 lk.  
[http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/dissertationen/Cramer\\_Diss.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/dissertationen/Cramer_Diss.pdf) (24.03.2018)
- Everaerts, J.** (2008). The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping. – *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, XXXVII*. Peking, Hiina. Lk 1187-1192.  
[https://www.researchgate.net/publication/228640891\\_The\\_use\\_of\\_unmanned\\_aerial\\_vehicles\\_UAVs\\_for\\_remote\\_sensing\\_and\\_mapping](https://www.researchgate.net/publication/228640891_The_use_of_unmanned_aerial_vehicles_UAVs_for_remote_sensing_and_mapping) (22.03.2018)
- Eisenbeiß, H.** (2009) UAV Photogrammetry. Doktoritöö. Šveitsi Föderaalne Tehnikainstituut. Zürich. 203 lk.  
[http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue\\_Berichte\\_PDF/105.pdf](http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/105.pdf) (21.03.2018)
- Gonçalves, J.A., Henriques, R.** (2015) UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing nr 104*. Lk 101–111.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615000532> (22.03.2018)
- Hoffmann, G. M., Rajnarayan, D. G., Waslander, S. L., Dostal, D., Jang, J. S., Tomlin, C. J.** (2004) The Stanford Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi Agent Control STARMAC) – *23rd Digital Avionics System Conference*. Lk12.E.4-1-12.E.4-10.  
[https://people.eecs.berkeley.edu/~tomlin/papers/conferences/hrwdjt04\\_dasc.pdf](https://people.eecs.berkeley.edu/~tomlin/papers/conferences/hrwdjt04_dasc.pdf) (24.03.2018)
- Hubel, P.,M., Liu, J., Guttosch, R.,J.** (2004) Spatial Frequency Response of Color Image Sensors: Bayer Color Filters and Foveon X3. – *International Society for Optics and Photonics*. Ameerika Ühendriigid. 4 lk.  
<http://foveon.net/files/FrequencyResponse.pdf> (29.03.2018)
- Huul, K.** (2016) Drooni fotogramm-meetria rakendamise kõrgusmudelite ja ortofotode loomiseks Raadi karjääri näitel. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikooli Ökoloogia ja maateaduste instituut. Tartu. 46 lk.  
[http://taurus.gg.bg.ut.ee/geouudis/geo\\_2016/Bak/Huul\\_Kaspar.pdf](http://taurus.gg.bg.ut.ee/geouudis/geo_2016/Bak/Huul_Kaspar.pdf) (02.04.2018)
- Know Basics about Photogrammetry Quickly and Become Expert (2018) *GrindGIS koduleht*.  
<http://grindgis.com/blog/basics-photogrammetry#prettyPhoto> (04.05.2018)
- Kutseliste kasutajatele. (2018) *DroneRules koduleht*.  
<http://dronerules.eu/et/professional> (26.03.2018)
- Käitaja meelespea: Mehitamata õhusõiduki (s.h drooni) käitamine. (2018) *Lennuameti koduleht*.  
[https://www.ecaa.ee/sites/default/files/content-editors/ops/droonid/meelespea\\_kaitajale.pdf](https://www.ecaa.ee/sites/default/files/content-editors/ops/droonid/meelespea_kaitajale.pdf) (26.03.2018)

- Köök, R.** (2018) Mehitamata lennumasinate (UAV) fotogramm-meetriliste mõõdistuste põhjal koostatavate pinnamudelite täpsus tee-ehituslike rakenduste näitel. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja arhitektuuri instituut. Tallinn. 92 lk.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C.** (2005) Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. Ameerika Ühendriigid: CRC Press. 318 lk  
[https://nguyenduyliemgis.files.wordpress.com/2014/11/digital-terrain-modeling-principles-and-methodology\\_2005.pdf](https://nguyenduyliemgis.files.wordpress.com/2014/11/digital-terrain-modeling-principles-and-methodology_2005.pdf) (19.03.2018)
- Liba, N.** (2005) Fotogramm-meetria alused. Tartu: OÜ Halo Kirjastus. 303 lk.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., Chandra, S.** (2007). The Effect of LiDAR Data Density on DEM Accuracy. – *MODSIM07 International Congress on Modeling and Simulation*, Uus-Meremaa, lk 1363-1369.  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.4833&rep=rep1&type=pdf> (15.03.2018)
- Maa-ameti kaardirakendus. (2018). <http://xgis.maaamet.ee/> (02.05.2018)
- Markšeideritöö kord. (vastu võetud 23.01.2012, viimati jõustunud 28.01.2012) – *Riigi Teataja*  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/125012012004> (15.03.2018)
- Meenar, M. R., Sorrentino J. A.** (2009) Dealing with 3D Surface Models: Raster and TIN. – *Handbook of Research on Geoinformatics. Information science reference*. Hassan A. Karimi. New York. Hershey, lk 73-81.
- Niethammer, U., Rothmund, S., Joswig, M.** (2009). UAV-based remote sensing of the slow moving landslide Super-Sauze. – *Landslide processes*. Prantsusmaa, Strasbourg: CERG Editions,. Lk 69-74.  
[https://www.researchgate.net/publication/255650842\\_UAV-based\\_remote\\_sensing\\_of\\_the\\_slow-moving\\_landslide\\_Super-Sauze](https://www.researchgate.net/publication/255650842_UAV-based_remote_sensing_of_the_slow-moving_landslide_Super-Sauze) (24.03.2018)
- O'Connor, J., Smith, M.J., James, M.R.** (2017): Cameras and Settings for Aerial Surveys in the Geosciences: Optimizing Image Data. Suurbritannia. 42 lk.  
[http://eprints.lancs.ac.uk/88309/2/PiPG\\_paper\\_no\\_TCs.pdf](http://eprints.lancs.ac.uk/88309/2/PiPG_paper_no_TCs.pdf) (29.03.2018)
- Ouédraogo, M., M., Degré, M., Debouche, C., Lisein, J.** (2014) The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. – *Geomorphology*. 2014. Nr 214. Lk 339–355.  
[https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/164321/1/Ouedraogo\\_2014\\_TLS\\_UAS.pdf](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/164321/1/Ouedraogo_2014_TLS_UAS.pdf) (04.04.2018)
- Peterson, S.** (2018) Computing Constrained Delaunay Triangulations. University of Minnesota.  
[http://www.geom.uiuc.edu/~samuelp/del\\_project.html](http://www.geom.uiuc.edu/~samuelp/del_project.html) (28.04.2018)
- Phantom 4 Pro Specs (2018) *DJI Koduleht*.  
<https://www.dji.com/phantom-4-pro/info> (03.05.2018)

- Raeva, P., L., Filipova, S., L., Filipov, D., G.** (2016) Volume computation of a stockpile – a study case comparing GPS and UAV measurements in an open pit quarry. – *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016*. Praha, Tšehhi. Lk 999-1004.  
<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B1/999/2016/isprs-archives-XLI-B1-999-2016.pdf> (06.04.2018)
- Randjärv, J.** (1997). Geodeesia I osa. Tartu. 399 lk.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni M., Sarazzi D.** (2011) UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling: Current Status and Future Perspectives. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2011 nr 38 Zürich, Šveits . 7 lk.  
<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/25/2011/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011.pdf> (01.04.2018)
- Rhodes, R., K.** (2017) UAS as an Inventory Tool: A Photogrammetric Approach to Volume Estimation. Magistratöö. Arkansas Ülikool. Monticello. 104 lk.  
<http://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3963&context=etd> (03.04.2018)
- Riigisisesed lennureeglid ja erandid ning erisused komisjoni rakendusmääruses (EL) nr 923/2012 sätestatud lennureeglitest. (vastu võetud 26.03.2015, viimati jõustunud 20.06.2016) – *Riigi Teataja*  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/117062016006?leiaKehtiv> (26.03.2018)
- Siriba, D. N., Matara, S. M., Musyoka, S. M.** (2015). Improvement of volume estimation of stockpile of earthworks using a concave hull- footprint. – *Micro, Macro & Mezzo Geo Information*, 2014, nr 5, lk 11-25.  
[https://www.researchgate.net/profile/Sammy\\_Matara/publication/287196050\\_Improvement\\_of\\_volume\\_estimation\\_of\\_stockpile\\_of\\_earthworks\\_using\\_a\\_concave\\_hull-footprint/links/5672399708ae54b5e460c069/Improvement-of-volume-estimation-of-stockpile-of-earthworks-using-a-concave-hull-footprint.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Sammy_Matara/publication/287196050_Improvement_of_volume_estimation_of_stockpile_of_earthworks_using_a_concave_hull-footprint/links/5672399708ae54b5e460c069/Improvement-of-volume-estimation-of-stockpile-of-earthworks-using-a-concave-hull-footprint.pdf) (15.03.2018)
- Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded. (vastu võetud 14.04.2016, viimati jõustunud 22.04.2016) – *Riigi Teataja*  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/119042016003> (15.03.2018)
- Täiendavad nõuded topo-geodeetistele uurimistöodele teede projekteerimisel (kinnitatud 13.05.2008) – *Maanteeamet*  
[https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/projekteerimine/t2iendavad\\_n6uded\\_topo\\_geodeetistele\\_uurimist88dele.pdf](https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/projekteerimine/t2iendavad_n6uded_topo_geodeetistele_uurimist88dele.pdf) (15.03.2018)
- Trimble SX10 Scanning Total Station Datasheet (2017) *Trimble koduleht*

<https://drive.google.com/file/d/0B06YCVIYEilgUFJFX29rSUpSMzQ/view> (03.05.2018)  
User Guide: Trimble R8 Model 4 GNSS Receiver, Trimble R6 Model 4 GNSS Receiver, Trimble R4 Model 2 GNSS Receiver (2013) *Trimble koduleht*  
[http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-666219/R8-R6-R4\\_v480A\\_UserGuide.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-666219/R8-R6-R4_v480A_UserGuide.pdf) (03.05.2018)  
**van Blyenburgh, P.** (1999) UAVs: an Overview. – *Air & Space Europe*. I, 5/6, lk 43-47.  
[https://ac.els-cdn.com/S1290095800888693/1-s2.0-S1290095800888693-main.pdf?\\_tid=30609d5c-b798-41e6-8e81-b0dde5f2edc4&acdnat=1525855895\\_7dd684cd09371dad18379f70c3cd3b98](https://ac.els-cdn.com/S1290095800888693/1-s2.0-S1290095800888693-main.pdf?_tid=30609d5c-b798-41e6-8e81-b0dde5f2edc4&acdnat=1525855895_7dd684cd09371dad18379f70c3cd3b98) (22.03.2018)

# **ACCURACY OF STOCKPILE VOLUME CALCULATIONS BASED ON UAV PHOTOGRAMMETRY**

## **Summary**

Due to the overall development of technology, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) are being used more widely. Unmanned aerial vehicles and the cameras have been developing fast during the recent years. The popularity of UAVs has caused mass production and lower prices of these instruments. Development of photogrammetry software has made it possible to use commercial cameras for photogrammetrical purposes. Generally the fast development of both hardware and software has made it possible to use unmanned aerial vehicles in geodesy.

The aim of current study was to assess the compliance of accuracy of stockpile volume calculations based on UAV photogrammetry to current laws in Estonia. This is important because land surveyors have an interest in finding effective ways to survey and assessing the accuracy of these ways. Two different UAVs and two different objects were compared in this study. The accuracy of photogrammetric models was also compared to the accuracy of a model based on RTK GNSS survey. Amount of time spent on different parts of the project was also evaluated.

Data used in current study was collected in autumn of 2017 in Laiküla peat extraction area in Lääne County, Estonia and spring of 2018 in Karude gravel pit in Järva County, Estonia. The observed objects were a regularly shaped peat stockpile and an irregularly gravel stockpile. On the first site, data was collected with a terrestrial laser scanner, a GNSS device and two different UAVs. On the second site data was collected with a terrestrial laser scanner, a GNSS device and one UAV. For accuracy assessment, volume of different models was compared to the volume of the models based on laser scanning data.

The study found that the RMSE (Root Mean Square Error) of different photogrammetrical models of the Laiküla object (722,52 m<sup>3</sup>) was 14,31 m<sup>3</sup> and the RMSE of different

photogrammetrical models of the Karude object ( $674,04 \text{ m}^3$ ) was  $20,95 \text{ m}^3$ . Relative errors of all of the photogrammetrical models were under 4%, which is smaller than the allowed error of 12% in Estonia. Relative error of RTK GNSS model of Laiküla object was 5,81% and relative errors of different photogrammetric models of the same object were between 0,70% and 3,19%. Respective errors of Karude object were 3,28% and 2,32% to 3,70%. It was found that when measuring smaller objects it is efficient to use RTK GNSS, but the advantages of UAV photogrammetry become apparent as the size and complexity of the objects grows.

Results show that using UAV photogrammetry to determine stockpile volumes is sufficiently accurate with both of the tested UAVs. Still, it is important that using UAVs for geodetic work, would be done by trained professionals and all the legal requirements would be met. It was found that sufficient accuracy was also achieved without using the GCP's (Ground Control Points). However, using GCPs did increase the accuracy. Furthermore, using different types of GCPs had no impact to the accuracy of the volume. Still, using more GCPs also increased the accuracy. It was found that results of the two objects with different characteristics were in the same accuracy range, however results of the regularly shaped peat stockpile were a bit more accurate. Results show that, when surveying large areas, using UAV photogrammetry can save a lot of time on field work compared to GNSS surveys.

On this basis, it can be concluded that UAV photogrammetry could be an efficient alternative for determining stockpile volumes in Estonia. It can also be concluded that even the commercial UAVs could be used for tasks that don't require very high accuracy.

**LISAD**



## Lisa 1. Uurimistöös kasutatud riistvara spetsifikatsioonid

**Tabel 1.** Trimble R4-3 spetsifikatsioonid (User Guide: Trimble 2013)

	<b>Väärtus</b>
<b>Suurus</b>	19 x 10,4 cm
<b>Kaal</b>	1,52 kg
<b>Aku kestvus</b>	Ainult vastuvõttes 5 tundi Saates ja vastuvõttes 2,5 tundi
<b>Töötamiseks sobilik temperatuur</b>	-40 °C kuni +65 °C Akud töötavad kuni -20 °C ja GSM kuni -30 °C temperatuuriga
<b>Korpus</b>	Vastab IP67 nõuetele
<b>Staatilise positsioneerimise horisontaalne täpsus</b>	3 mm + 0,1 ppm RMS
<b>Staatilise positsioneerimise vertikaalne täpsus</b>	3.5 mm + 0.4 ppm RMS
<b>RTK positsioneerimise horisontaalne täpsus</b>	8 mm + 0.5 ppm RMS
<b>RTK positsioneerimise vertikaalne täpsus</b>	15 mm + 0.5 ppm RMS
<b>Initsialiseerimise aeg</b>	Tavaliselt alla 8 sekundi
<b>Vastuvõetavad signaalid</b>	GPS: L1 C/A, L1C, L2C, L2E GLONASS: L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3 Galileo: E1, E5A, E5B BeiDou (COMPASS): B1, B2 SBAS: QZSS, WAAS, EGNOS, GAGAN

**Tabel 2.** Trimble SX10 spetsifikatsioonid (Trimble SX10 Scanning ... 2017)

<b>Tahhümeetri omadused</b>	
Nurga mõõtmise täpsus	1''
Kompensaatori täpsus	0,5''
Kompenseeritav vahemik	±5,4'
Kauguse mõõtmise täpsus prismaga	1 mm + 1,5 ppm
Kauguse mõõtmise täpsus prismaga, <i>Tracking</i>	2 mm + 1,5 ppm
Kauguse mõõtmise täpsus laseriga	2 mm + 1,5 ppm
Mõõtmisaeg prismaga	1,6 s
Mõõtmisaeg laseriga	1,2 s
Mõõtmise ulatus prismaga	1 kuni 5500 m
Mõõtmise ulatus laseriga	1 kuni 800 m
<b>Skanneri omadused</b>	
Skanneri tööpõhimõte	Pöörlev prisma
Mõõtmiste sagedus	26,6 kHz
Punktide vahekaugused 50 m kaugusel skannerist	6,25, 12,5, 25, või 50 mm
Vaateväli	360° x 300°
Terve vaatevälja skaneerimiseks kuluv aeg 50 mm punktide vahekauguse puhul	12 minutit
Mõõtmise ulatus	0,9 kuni 600 m
Skaneerimisel mõõdetud nurga täpsus	5''
Skaneeritud punkti koordinaatide täpsus 100 m kaugusel skannerist	2,5 mm
Skanneri laseri klass	1M
Skanneri laseri lainepikkus	1550 nm
Kiire läbimõõt 100 m kaugusel	14 mm
Töötamiseks sobilik temperatuur	-20 °C kuni 50 °C
<b>Üldised omadused</b>	
Korpus	Vastab IP55 nõuetele
Aku kestvus ühe akuga	2 kuni 3 tundi
Kaal	7,5 kg

**Tabel 3.** DJI Phantom 4 pro v2.0 spetsifikatsioonid (Phantom 4 Pro ... 2018)

<b>Õhusõiduk</b>	
Kaal	1375 g
Läbimõõt ilma rootoriteta	350 mm
Maksimum tõusmise kiirus	S-mode ( <i>sport</i> ): 6 m/s P-mode ( <i>positioning</i> ): 5 m/s
Maksimum laskumise kiirus	S-mode ( <i>sport</i> ): 4 m/s P-mode ( <i>positioning</i> ): 3 m/s
Maksimum kiirus	S-mode ( <i>sport</i> ): 72 km/h A-mode ( <i>ATTI</i> ): 58 km/h P-mode ( <i>positioning</i> ): 50 km/h
Maksimum lennukõrgus merepinnast	6000 m
Maksimum lubatud tuule kiirus	10 m/s
Maksimum lennu aeg	Umbes 30 minutit
Töötamiseks sobilik temperatuur	0° kuni 40°C
GNSS ühilduvus	GPS ja GLONASS
Hõljumise täpsus	Vertikaalne: ±0.1 m ( <i>Vision Positioning</i> ) ±0.5 m ( <i>GPS Positioning</i> ) Horisontaalne: ±0.3 m ( <i>Vision Positioning</i> ) ±1.5 m ( <i>GPS Positioning</i> )
<b>Vision positsioneerimissüsteem</b>	
Vaatlusuunad	Ette, taha, alla
Kiiruse vahemik	Kuni 50 km/h 2 m kõrgusel maapinnast
Kõrguse vahemik	0 kuni 10 m
Tööulatus	0 kuni 10 m
Takistuse tajumise ulatus	0,7 kuni 30 m
Vaateväli	Ette: 60° (horisontaalselt), ±27° (vertikaalselt) Taha: 60° (horisontaalselt), ±27° (vertikaalselt) Alla: 70°(ette ja taha), 50° (vasakule ja paremale)
Mõõtmise sagedus	Ette ja taha 10 Hz, alla 20 Hz
<b>Infrapuna positsioneerimissüsteem</b>	
Takistuse tajumise ulatus	0,2 kuni 7 m
Vaateväli	70° (horisontaalselt), ±10° (vertikaalselt)
Mõõtmise sagedus	10 Hz
<b>Kardaanliigend</b>	
Stabiliseerimine	Kolmel teljel (põikikalle/pikikalle/suund)
Kontrollitav ulatus	Pikikalle -90° kuni +30°
Maksimaalne kontrollitav nurkkiirus	Pikikalle 90°/s
Vibratsiooni ulatus	±0.02°
<b>Õhusõiduki aku</b>	
Mahutavus	5870 mAh
Pinge	15,2 V
Aku tüüp	LiPo 4S
Energia	89.2 Wh
Kaal	468 g
Laadimiseks sobilik temperatuur	5° kuni 40°C
Maksimum laadimise võimsus	160 W

**Tabel 4.** DJI Phantom 4 pro v2.0 kaamera ja lisaseadmete spetsifikatsioonid (Phantom 4 Pro ... 2018)

<b>Kaamera</b>	
Sensor	1'' CMOS, 20 MP
Objektiiv	Vaatenurk 84°, fookuskaugus 8,8 mm/24 mm, ava f/2.8 - f/11, automaatne fookus 1 m kuni $\infty$
ISO vahemik	Video: 100 - 3200 (automaatne) 100 - 6400 (manuaalne) Foto: 100 - 3200 (automaatne) 100- 12800 (manuaalne)
Mehaaniline säriaeg	8 - 1/2000 s
Elektrooniline säriaeg	8 - 1/8000 s
Pildi suurus	3:2 suhe: 5472 × 3648 4:3 suhe: 4864 × 3648 16:9 suhe: 5472 × 3078
Video salvestamise tüübid	C4K:4096×2160 24/25/30p @100Mbps 4K:3840×2160 24/25/30p @100Mbps 2.7K:2720×1530 24/25/30p @65Mbps 2.7K:2720×1530 48/50/60p @80Mbps FHD:1920×1080 24/25/30p @50Mbps FHD:1920×1080 48/50/60p @65Mbps FHD:1920×1080 120p @100Mbps HD:1280×720 24/25/30p @25Mbps HD:1280×720 48/50/60p @35Mbps HD:1280×720 120p @60Mbps
Foto formaadid	JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG
Video formaadid	MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265)
Mälukaart	Micro SD Maksimum maht: 128GB Kirjutamise kiirus $\geq 15$ MB/s
Töötamiseks sobilik temperatuur	0° kuni 40°C
<b>Laadija</b>	
Pinge	17,4 V
Võimsus	100 W
<b>Mobiilirakendus</b>	
Rakenduse nimi	DJI GO 4
Reaalajas jälgimise töösagedus	2.4 GHz ISM, 5.8 GHz ISM
Reaalajas jälgimise kvaliteet	720P @ 30fps, 1080P @ 30fps
Vajalik operatsioonisüsteem	iOS 9.0 või uuem Android 4.4.0 või uuem
<b>Pult</b>	
Töösagedus	2,400 – 2,483 GHz ja 5,725 – 5,850 GHz
Maksimum ulatus	7 km
Töötamiseks sobilik temperatuur	0° kuni 40°C
Aku	6000 mAh

**Tabel 5.** Aibotix Aibot X6 spetsifikatsioonid (Aibot X6 2018)

Mõõdud	1,05 x 1,05 x 0,45 m
Korpus	CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
Kaal	3,4 kg
Maksimum last	2,0 kg
Maksimum kiirus	40 km/h
Tõusmise kiirus	8 m/s
Lennu kõrgus	Kuni 500 m maapinnast, kuni 3000 m merepinnast
Raadiosaatja tööulatus	Kuni 1000 m
Lennuaeg	Kuni 20 min
Töötamiseks sobilik temperatuur	-20° C kuni 40° C
RTK	+
Güroskoop	+
Kiirenduse mõõtja	+
Baromeeter	+
Magnetomeeter	+
Ultraheli sensorid	+
Juhtimine	Puldiga ja autonoomne, missiooni järgi
Aku	Lithium-polymer 10000 mAh
Tarkvara	Aibotix AiProFlight

**Tabel 6.** Sony ILCE-7RM2 spetsifikatsioonid (Aibot X6 2018)

(ILCE-7RM2 Full Specifications ... 2018)

Sensor	35 mm, 1,41 tolli x 0,94 tolli
Piksleid	42,4 MP
Salvestatavad pildi formaadid	JPEG, RAW
Pildi suurus pikslites, 3:2	7952 x 5304
Pildi suurus pikslites, 16:9	7952 x 4472
Salvestatavad video formaadid	XAVC S/AVCHD format Ver. 2.0 compliant/MP4
Video kvaliteet	XAVC S 4K: 3840 x 2160 (30p/100 Mbps, 30p/60 Mbps, 24p/100 Mbps, 24p/60 Mbps), XAVC S HD: 1920 x 1080 (60p/50 Mbps, 30p/50 Mbps, 24p/50 Mbps), 1280 x 720 (120p/50 Mbps), AVCHD: 1920 x 1080 (60p/28 Mbps/PS, 60i/24 Mbps/FX, 60i/17 Mbps/FH, 24p/24 Mbps/FX, 24p/17 Mbps/FH), MP4: 1920 x 1080 (60p/28 Mbps, 30p/16 Mbps), 1280 x 720 (30p/6 Mbps)
Mälukaart	SD
Säriaeg	1/8000 kuni 30 s
Fookuskaugus	35 mm

## Lisa 2. GNSS mõõtmiste raportid

**Tabel 1.** Laiküla objekti GNSS raport

Point coordinates for job laikyla2410217								
Point	North	East	Elev	Code	Hz Prec	Vt Prec	PDOP	Sats
38	6512600,896	502088,672	8,596	tee	0,006	0,011	1,3	19
k1	6512612,899	502081,698	11,28		0,015	0,021	1,3	17
k10	6512610,697	502043,503	8,172		0,019	0,028	1,7	14
k11	6512609,825	502049,746	8,081		0,027	0,043	1,8	13
k12	6512609,52	502060,988	8,064		0,026	0,042	1,8	13
k13	6512608,175	502074,092	8,188		0,026	0,042	1,8	13
k14	6512607,891	502080,344	8,332		0,026	0,042	1,8	13
k15	6512605,979	502083,31	8,282		0,025	0,04	1,8	13
k16	6512610,157	502086,817	8,273		0,024	0,038	1,8	13
k17	6512613,006	502087,421	8,303		0,024	0,038	1,8	13
k18	6512616,628	502086,128	8,3		0,025	0,041	2	13
k19	6512618,568	502077,549	8,126		0,025	0,04	1,8	13
k2	6512613,756	502072,131	11,412	k	0,014	0,021	1,7	16
k21	6512619,508	502068,868	8,139		0,023	0,038	1,8	13
k25	6512620,481	502057,249	8,074		0,029	0,047	1,9	13
k28	6512620,229	502051,121	8,143		0,026	0,042	1,9	13
k29	6512620,033	502040,959	8,143		0,025	0,04	1,9	13
k3	6512614,983	502064,268	11,17		0,015	0,023	1,4	16
k4	6512615,36	502055,762	11,261		0,016	0,024	1,4	16
k5	6512614,815	502047,254	11,37		0,015	0,023	1,4	16
k6	6512616,743	502088,904	8,283		0,019	0,028	1,4	15
m2	6512618,857	502049,574	8,844		0,018	0,027	1,4	15
m20	6512617,211	502077,121	8,758	v4	0,025	0,04	1,8	13
m22	6512623,567	502066,68	8	v3	0,026	0,042	1,8	13
m23	6512618,893	502064,675	8,667	v10	0,032	0,05	1,8	13
m24	6512618,791	502057,279	9,032	v11	0,028	0,045	1,9	13
m26	6512622,931	502051,888	7,976	v2	0,028	0,045	1,9	13
m3	6512614,981	502064,273	11,165		0,015	0,023	1,4	16
m30	6512623,847	502036,854	7,923	v1	0,033	0,053	1,9	13
m31	6512606,693	502050,297	8,145	v9	0,029	0,046	1,9	13
m32	6512607,379	502056,01	8,124	v8	0,028	0,043	1,9	13
m33	6512604,65	502074,446	8,33	v7	0,031	0,048	1,9	13
m34	6512607,485	502082,438	9,132	v13	0,027	0,042	1,9	13
m35	6512603,97	502089,018	8,319	v9	0,024	0,037	1,9	13
m36	6512619,392	502089,708	8,156	v5	0,015	0,027	1,3	18

m4	6512612,149	502086,061	9,057		0,023	0,036	1,7	14
m5	6512614,823	502047,268	11,373		0,016	0,024	1,4	16
m6	6512616,735	502088,905	8,28		0,018	0,027	1,4	15
m7	6512610,524	502066,096	8,961		0,022	0,034	1,7	14
m8	6512611,512	502054,064	9,021		0,018	0,028	1,7	14
m9	6512614,353	502033,109	8,086		0,024	0,037	1,7	14



**Tabel 2.** Karude objekti GNSS raport

Point coordinates for job karude100418								
Point	North	East	Elev	Code	Hz Prec	Vt Prec	PDOP	Sats
1	6549972,959	580188,087	82,322	m	0,008	0,012	1,8	14
10	6549979,91	580200,229	81,744	m	0,008	0,012	1,8	15
100	6550028,086	580227,743	81,211	k1	0,006	0,01	1,5	16
1000	6550028,077	580227,743	81,212	k1	0,006	0,01	1,5	16
1001	6549985,522	580246,331	80,418	k1	0,006	0,01	1,5	16
1002	6549930,163	580249,53	79,919	k1	0,006	0,01	1,5	16
1003	6549943,446	580215,594	79,008	k1	0,006	0,01	1,4	16
1004	6549937,934	580140,116	81,564	k1	0,006	0,009	1,4	16
1005	6549966,15	580152,755	83,093	k1	0,006	0,009	1,4	15
1006	6550010,682	580199,117	80,408	k1	0,005	0,009	1,3	16
1007	6549984,125	580190,189	79,794	t23	0,005	0,009	1,3	16
1008	6549978,105	580190,247	80,535	t21	0,005	0,008	1,2	17
1009	6549975,718	580186,481	81,494	t24	0,005	0,008	1,2	17
1010	6549974,529	580181,854	79,569	t25	0,005	0,008	1,3	16
1011	6549968,946	580190,765	80,707	t19	0,005	0,008	1,2	17
1012	6549964,511	580193,26	78,99	t9	0,005	0,008	1,2	17
1013	6549966,229	580196,728	79,93	t18	0,005	0,008	1,2	17
1014	6549968,075	580199,923	80,771	t5	0,005	0,008	1,2	17
1015	6549969,074	580204,668	79,998	t1	0,005	0,008	1,2	17
1016	6549962,794	580206,689	78,972	t29	0,005	0,008	1,2	17
1017	6549972,863	580206,133	80,19	t6	0,005	0,008	1,2	16
1018	6549974,647	580208,976	80,786	t4	0,005	0,008	1,2	16
1019	6549969,423	580212,473	79,294	t28	0,005	0,009	1,3	15
1020	6549980,276	580203,093	80,663	t7	0,006	0,01	1,5	14
1021	6549985,869	580202,272	79,453	t22	0,006	0,011	1,5	14
1022	6549980,549	580196,256	81,956	t2	0,006	0,011	1,5	14
1023	6549976,874	580201,824	82,465	t3	0,006	0,011	1,5	14
1024	6549971,362	580197,027	81,8	t26	0,007	0,011	1,5	14
1025	6549974,035	580193,018	82,178	t30	0,006	0,011	1,5	14
11	6549978,607	580200,82	82,271	m	0,007	0,012	1,8	15
12	6549977,914	580202,045	82,46	m	0,007	0,012	1,8	15
13	6549976,549	580202,322	82,558	m	0,007	0,012	1,8	15
14	6549975,739	580203,117	82,222	m	0,007	0,012	1,8	15
15	6549975,635	580203,202	82,204	m	0,007	0,012	1,8	15
16	6549977,282	580203,51	82,087	m	0,007	0,012	1,8	15
17	6549976,294	580204,616	81,785	m	0,007	0,012	1,7	16
18	6549976,413	580205,708	82,025	m	0,007	0,012	1,8	15
19	6549975,451	580207,701	81,462	m	0,007	0,012	1,8	15
2	6549974,667	580188,215	82,403	m	0,008	0,012	1,8	14
20	6549974,608	580202,965	82,057	m	0,007	0,012	1,8	15

21	6549973,145	580203,049	81,974	m	0,007	0,012	1,8	15
22	6549971,507	580203,552	81,718	m	0,007	0,012	1,8	15
23	6549970,197	580201,912	81,66	m	0,007	0,012	1,8	15
24	6549970,09	580199,864	82,016	m	0,007	0,012	1,8	15
25	6549969,413	580197,455	81,841	m	0,007	0,012	1,8	14
26	6549969,438	580195,093	81,863	m	0,007	0,012	1,8	14
27	6549970,274	580192,994	82,057	m	0,007	0,012	1,8	14
28	6549971,276	580191,077	82,112	m	0,007	0,012	1,8	14
29	6549971,853	580189,615	82,093	m	0,007	0,012	1,8	14
3	6549975,992	580189,973	82,071	m	0,008	0,012	1,8	14
30	6549974,165	580190,464	82,417	m	0,007	0,012	1,8	14
31	6549973,211	580191,859	82,048	m	0,007	0,012	1,8	14
32	6549972,286	580192,976	82,153	m	0,007	0,012	1,8	14
33	6549971,192	580193,283	81,852	m	0,007	0,012	1,8	14
34	6549972,258	580195,054	81,911	m	0,007	0,012	1,8	14
35	6549973,497	580195,094	82,241	m	0,007	0,012	1,8	14
36	6549974,88	580192,948	82,32	m	0,007	0,012	1,8	14
37	6549975,449	580194,345	82,007	m	0,007	0,012	1,8	15
38	6549974,653	580196,33	82,413	m	0,007	0,012	1,7	15
39	6549973,449	580197,11	81,775	m	0,007	0,012	1,7	15
4	6549976,255	580192,5	82,033	m	0,008	0,012	1,8	14
40	6549971,802	580197,296	81,696	m	0,007	0,012	1,7	15
41	6549971,235	580199,274	82,134	m	0,007	0,012	1,7	15
42	6549973,87	580200,161	82,267	m	0,007	0,012	1,8	14
43	6549974,979	580199,793	82,005	m	0,007	0,012	1,8	14
44	6549976,15	580198,579	81,985	m	0,007	0,012	1,8	14
45	6549977,476	580195,101	81,844	m	0,007	0,011	1,8	15
46	6549977,391	580198,726	82,315	m	0,007	0,011	1,8	15
47	6549976,523	580200,85	82,401	m	0,007	0,011	1,7	15
48	6549981,269	580199,984	81,018	m	0,007	0,011	1,7	15
49	6549982,933	580200,285	80,365	m	0,006	0,011	1,7	16
5	6549976,471	580194,545	82,14	m	0,008	0,012	1,8	14
50	6549983,691	580198,761	80,436	m	0,006	0,011	1,6	16
51	6549982,656	580199,636	80,205	m	0,006	0,011	1,6	16
52	6549982,887	580198,861	80,192	m	0,006	0,011	1,6	16
53	6549982,449	580197,436	80,996	m	0,006	0,011	1,6	16
54	6549984,942	580197,727	79,742	m	0,006	0,011	1,6	16
55	6549984,397	580196,303	79,767	m	0,006	0,011	1,6	16
56	6549983,782	580194,842	79,726	m	0,006	0,011	1,6	16
57	6549982,444	580193,376	79,679	m	0,006	0,011	1,6	16
58	6549981,93	580191,872	79,702	m	0,006	0,011	1,6	15
59	6549981,25	580190,633	79,616	m	0,007	0,012	1,7	15
6	6549977,36	580195,322	81,917	m	0,008	0,012	1,8	14
60	6549979,587	580189,845	79,637	m	0,007	0,011	1,6	15
61	6549980,024	580188,233	79,64	m	0,007	0,012	1,6	15

62	6549979,438	580186,688	79,662	m	0,007	0,011	1,7	15
63	6549978,798	580185,42	79,687	m	0,006	0,011	1,7	15
64	6549977,465	580184,005	79,64	m	0,006	0,011	1,6	15
65	6549976,128	580183,237	79,575	m	0,006	0,011	1,6	15
66	6549974,237	580183,372	79,48	m	0,006	0,011	1,6	16
67	6549972,765	580183,675	79,427	m	0,006	0,011	1,6	15
68	6549970,969	580183,723	79,352	m	0,006	0,011	1,6	15
69	6549969,26	580184,449	79,291	m	0,006	0,011	1,6	15
7	6549978,907	580195,124	82,325	m	0,008	0,012	1,8	14
70	6549968,303	580185,751	79,268	m	0,007	0,011	1,6	14
71	6549967,508	580187,465	79,215	m	0,006	0,011	1,7	14
72	6549967,21	580189,076	79,207	m	0,006	0,011	1,6	16
73	6549966,523	580190,317	79,122	m	0,006	0,011	1,6	16
74	6549965,992	580191,874	79,102	m	0,006	0,011	1,6	16
75	6549965,132	580193,487	79,032	m	0,006	0,011	1,6	16
76	6549964,872	580195,449	78,989	m	0,006	0,011	1,6	16
77	6549964,607	580197,077	78,91	m	0,006	0,01	1,6	16
78	6549964,65	580198,895	78,876	m	0,006	0,01	1,6	16
79	6549965,218	580200,605	78,908	m	0,006	0,01	1,6	16
8	6549980,109	580196,892	82,273	m	0,008	0,012	1,8	14
80	6549965,68	580202,389	78,924	m	0,006	0,01	1,6	16
81	6549966,04	580203,741	78,961	m	0,006	0,01	1,6	16
82	6549967,043	580205,326	79,067	m	0,006	0,01	1,5	17
83	6549968,379	580205,549	79,226	m	0,006	0,01	1,5	17
84	6549969,687	580207,272	79,365	m	0,006	0,01	1,5	17
85	6549970,882	580207,381	79,382	m	0,006	0,01	1,5	17
86	6549972,626	580208,226	79,48	m	0,006	0,01	1,6	17
87	6549971,28	580209,588	79,361	m	0,006	0,01	1,6	17
88	6549971,949	580210,803	79,344	m	0,006	0,01	1,5	17
89	6549973,245	580211,572	79,307	m	0,006	0,01	1,5	17
9	6549979,628	580198,924	82,126	m	0,008	0,012	1,8	15
90	6549975,257	580211,238	79,397	m	0,006	0,01	1,5	17
91	6549976,714	580210,67	79,393	m	0,006	0,01	1,5	17
92	6549978,422	580209,46	79,374	m	0,006	0,01	1,5	17
93	6549979,603	580208,174	79,368	m	0,006	0,01	1,5	17
94	6549980,868	580206,666	79,368	m	0,006	0,01	1,5	16
95	6549981,669	580204,968	79,389	m	0,006	0,01	1,5	16
96	6549982,265	580203,81	79,445	m	0,006	0,011	1,6	15
97	6549983,096	580202,445	79,444	m	0,006	0,011	1,6	15
98	6549984,104	580201,051	79,596	m	0,006	0,011	1,6	15
99	6549984,72	580199,542	79,6	m	0,006	0,011	1,6	15

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Kaupo Kokamägi,

sünniaeg, 23.05.1990,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Mehitamata õhusõiduki abil tehtud aerofotode põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus, mille juhendajad on Natalja Liba ja Kristo Must,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 23.05.2018

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)